



# Prise en compte du facteur de crête dans le dimensionnement des systèmes de télécommunications

Yves Louët

## ► To cite this version:

Yves Louët. Prise en compte du facteur de crête dans le dimensionnement des systèmes de télécommunications. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université Rennes 1, 2010. tel-00471891

**HAL Id: tel-00471891**

**<https://theses.hal.science/tel-00471891>**

Submitted on 9 Apr 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Habilitation à Diriger des Recherches**

présentée devant

l'UNIVERSITÉ DE RENNES I

par

**Yves LOUËT**

## **Prise en compte du facteur de crête dans le dimensionnement des systèmes de télécommunications**

Soutenue le 21 Janvier 2010

### **Commission d'examen**

#### **Rapporteurs**

Prof. Maurice Bellanger (CNAM, Paris)

Prof. Guillaume Gelle (Univ. Champagne-Ardennes, Reims)

Prof. Hanna Bogucka (Poznan Univ. of Technology, Poznan, Pologne)

#### **Examineurs**

Prof. Amine El Sahili (Université Libanaise, Beyrouth)

Prof. Pascal Scalart (Université de Rennes 1, Rennes)

Prof. Jacques Palicot (SUPELEC, Campus de Rennes)

### **Laboratoire**

SUPELEC - Equipe SCEE (Signal Communication et Electronique Embarquée)

IETR - UMR CNRS 6164 - Groupe Automatique et Communications



# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>iii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>vii</b>
	<b>ix</b>
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>2 Synthèse des activités de recherche</b>	<b>7</b>
2.1 Curriculum vitae . . . . .	7
2.1.1 Présentation du candidat . . . . .	7
2.1.2 Formation . . . . .	7
2.1.3 Diplômes . . . . .	7
2.1.4 Parcours professionnel . . . . .	8
2.1.5 Bilan de la production scientifique . . . . .	8
2.1.6 Bilan des encadrements de recherche . . . . .	8
2.1.7 Bilan des activités internationales . . . . .	8
2.1.8 Bilan des activités nationales . . . . .	8
2.2 Résumé de ma thèse de Doctorat . . . . .	8
2.3 Résumé de l'activité d'enseignement . . . . .	9
2.3.1 Enseignement en tronc commun (Première et Deuxième année) . . .	9
2.3.2 Enseignement en Troisième année . . . . .	9
2.3.3 Enseignement en Formation Continue . . . . .	9
2.4 Compétences techniques et activités d'expertise . . . . .	10
2.5 Encadrement d'activités de recherche . . . . .	10
2.5.1 Encadrements de thèses . . . . .	10
2.5.1.1 Thèse de Sylvain Tertois . . . . .	10
2.5.1.2 Thèse de Thomas Ta . . . . .	11
2.5.1.3 Thèse de Sidkiéta Zabré . . . . .	11
2.5.1.4 Thèse d'Ali Al Ghouwayel . . . . .	11
2.5.1.5 Thèse de Basel Rihawi . . . . .	11
2.5.1.6 Thèse de Sajjad Hussain . . . . .	11
2.5.1.7 Thèse de Désiré Guel . . . . .	12
2.5.2 Encadrements de post-doctorants . . . . .	12
2.5.2.1 Post-doctorat d'Irène Mahafano . . . . .	12
2.5.2.2 Post-doctorat d'Alexandre Skrzypczak . . . . .	12
2.5.2.3 Post-doctorat d'Hongzhi Wang . . . . .	12

2.5.3	Encadrements de stages . . . . .	13
2.5.3.1	Stage d'Ingénieur de Boris Le Labousse . . . . .	13
2.5.3.2	Stage d'Ingénieur d'Hervé Breton . . . . .	13
2.5.3.3	Stage de DEA d'Amin Youb . . . . .	13
2.5.3.4	Stage de DEA de Mohamed Ghazzi . . . . .	13
2.5.3.5	Stage de Master Recherche de Steredenn Daumont . . . . .	13
2.5.3.6	Stage de Master Recherche de Sidi Issa Ahmedou . . . . .	13
2.5.3.7	Stage de Master Recherche de Patricia Kaiser . . . . .	13
2.6	Participation à des jurys de thèse en qualité d'examineur . . . . .	14
2.7	Animation de la recherche . . . . .	14
2.7.1	Organisation de sessions spéciales dans des conférences internationales . . . . .	14
2.7.2	Tutorials dans des conférences internationales . . . . .	15
2.7.3	Présidences de sessions dans des conférences internationales . . . . .	15
2.7.4	Reviewers d'articles de revues et de conférences internationales . . . . .	15
2.7.4.1	Revue internationale . . . . .	15
2.7.4.2	Comités techniques de conférences (TPC) . . . . .	15
2.7.5	Animation de la recherche au niveau national . . . . .	16
2.8	Projets collaboratifs . . . . .	16
2.8.1	Projets internationaux . . . . .	16
2.8.2	Projets nationaux . . . . .	16
2.9	Projets bilatéraux . . . . .	18
2.10	Expertise de projets . . . . .	19
2.11	Production scientifique . . . . .	19
2.11.1	Chapitres d'ouvrages collectifs . . . . .	19
2.11.2	Publications acceptées dans des revues internationales à comités de lecture . . . . .	19
2.11.3	Brevets . . . . .	20
2.11.4	Publications dans des conférences internationales à comités de lecture . . . . .	20
2.11.5	Publications dans des conférences nationales à comités de lecture . . . . .	23
2.11.6	Mémoires de recherche . . . . .	24
2.12	Rapports d'études . . . . .	24
2.12.1	Rapports dans le cadre de projets collaboratifs européens . . . . .	24
2.12.2	Rapports dans le cadre de projets collaboratifs français . . . . .	24
2.12.3	Rapports dans le cadre de projets bilatéraux . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Travaux de recherche</b>	<b>27</b>
3.1	Introduction . . . . .	27
3.2	Résumé des travaux sur le PAPR . . . . .	27
3.2.1	Description analytique du PAPR . . . . .	27
3.2.1.1	Contribution sur le Power Ratio (PR) . . . . .	27
3.2.1.2	Contribution sur le lien entre le PMEPR et le PAPR . . . . .	28
3.2.1.3	Contribution sur la majoration du PR en modulation monoporteuse avec filtrage de Nyquist . . . . .	28
3.2.1.4	Contribution sur la majoration du PR en modulation monoporteuse avec filtrage en racine de Nyquist . . . . .	29

3.2.1.5	Contribution sur la mise en évidence de l'influence du canal de propagation dans la statistique du PR des signaux de réception . . . . .	29
3.2.1.6	Contribution sur la moyenne et variance PR pour des signaux OFDM continus . . . . .	29
3.2.1.7	Contribution sur la statistique du PR pour des signaux radio logicielle . . . . .	30
3.2.1.8	Contribution sur la formulation fréquentielle du PR . . . . .	30
3.2.2	Développement de méthodes de réduction du PR et de réduction des linéarités causées par l'amplificateur de puissance . . . . .	31
3.2.2.1	Contribution sur la classification des méthodes de la littérature . . . . .	31
3.2.2.2	Contribution sur la réduction des non linéarités créées l'amplificateur de puissance à l'aide de réseaux de neurones . . . . .	32
3.2.2.3	Contribution sur la réduction des non linéarités de l'amplificateur à l'aide d'une fonction de clipping inversible . . . . .	33
3.2.2.4	Contribution sur la réduction du PR à l'aide de codage de canal . . . . .	34
3.2.2.5	Contribution sur la réduction du PR par méthode géométrique . . . . .	34
3.2.2.6	Contribution sur la réduction du PR dans les systèmes MIMO-OFDM . . . . .	35
3.2.2.7	Contribution sur la réduction du PR à l'aide de porteuses hors bande créées par suréchantillonnage . . . . .	36
3.2.2.8	Contribution sur la réduction du PR à l'aide de porteuses réservées dans la bande utile du spectre . . . . .	36
3.2.2.9	Contribution sur la réduction du PR à l'aide des bandes libres d'un spectre radio logicielle . . . . .	38
3.2.2.10	Contribution sur la réduction de PR à l'aide d'une fonction de clipping hyperbolique . . . . .	38
3.2.2.11	Contribution sur la réduction du PR à l'aide de la fonction de deep-clipping . . . . .	39
3.3	Résumé des travaux sur la paramétrisation . . . . .	40
3.3.1	Contexte des travaux . . . . .	40
3.3.2	Contribution sur la paramétrisation par opérateurs communs . . . . .	40
3.3.3	Contribution sur l'opérateur commun FFT . . . . .	41
3.3.4	Contribution sur l'identification d'opérateurs communs par graphes . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Publications majeures</b>	<b>45</b>
4.1	Article sur la définition du Power Ratio et analyse en modulation mono porteuse avec filtrage de Nyquist . . . . .	47
4.2	Article sur l'analyse du PAPR en modulation mono porteuse après filtrage en racine de Nyquist . . . . .	48
4.3	Article sur la vision fréquentielle du PAPR et les conséquences dans l'accès au spectre . . . . .	49
4.4	Article sur la classification de méthodes . . . . .	50
4.5	Article sur les codes de Reed-Muller et la réduction du PAPR . . . . .	51

4.6	Article sur le PAPR des systèmes MIMO . . . . .	52
4.7	Articles sur la réduction du PAPR par réservation de porteuses . . . . .	53
4.8	Article sur la paramétrisation par opérateurs communs . . . . .	54
4.9	Articles sur la paramétrisation et l'approche par les graphes . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Conclusion générale, perspectives et projet de recherche</b>	<b>57</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>61</b>

# Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps Hanna Bogucka, Guillaume Gellé et Maurice Bellanger d'avoir accepté de rapporter sur mon travail. Leur participation à la soutenance a de plus permis d'établir une discussion riche sur mes activités de recherche. J'adresse aussi un immense merci à Amine El Sahili et à Pascal Scalart qui, en qualité d'examinateurs, ont accepté de participer au jury.

Une autre salve de profonds remerciements va ensuite aux collègues de l'Equipe SCEE et en particulier à Jacques Palicot qui m'a toujours soutenu sans relâche pour améliorer la qualité et la visibilité de mon travail. Viennent ensuite les thésards et post-doctorants qui m'ont accompagnés : Sylvain Tertois, Thomas Ta, Sidkiéta Zabré, Ali Al Ghouwayel, Désiré Guel, Sajjad Hussain, Basel Rihawi, Alexandre Skrzypczak, Irène Mahafeno et Anh Tai.

Je tiens enfin à remercier le personnel de SUPELEC pour sa gentillesse, sa disponibilité et son aide permanente.





*à Oriane,*



# Chapitre 1

## Introduction générale

Ce document résume l'ensemble de mes activités de recherche depuis mon stage de DEA en 1996 jusqu'à aujourd'hui, mi 2009. La thématique générale est celle des télécommunications abordée sous différents aspects : les études de la propagation, le traitement du signal et les communications numériques.

Durant ces années, j'ai eu la chance de cotoyer des aspects différents, complémentaires mais fondamentaux dans le dimensionnement d'un système de télécommunications :

- participation à la réalisation d'un RADAR VHF au Laboratoire Radiocom de l'Université de Rennes 1 en qualité de scientifique du contingent
- études du canal de propagation radio à SIRADEL SA en qualité d'Ingénieur RetD
- contribution aux algorithmes de traitement du signal pour les modulations multiporteuse lors de ma thèse de Doctorat et de mes fonctions actuelles d'enseignement et de recherche

Bien qu'éloignées de mes préoccupations actuelles, mes activités passées liées à la modélisation du canal radio n'en sont pas moins fondamentales : comment en effet comprendre l'intérêt des modulations multiporteuse sans avoir appréhendé l'impact des trajets multiples de la propagation radio ? Et comment ensuite comprendre le rôle clé de l'amplificateur de puissance sans avoir eu la chance de participer à des campagnes de mesures sur terrain pour la planification de réseaux radio ? Ces deux exemples ne sont pas tirés au hasard : mes activités de recherche se concentrent en effet aujourd'hui essentiellement sur l'amplification de puissance de signaux multiporteuse. Cette thématique a été celle de ma thèse entre les années 1997 et 2000 pour des signaux de type OFDM<sup>(1)</sup> et je l'étudie encore aujourd'hui mais dans des contextes différents, notamment appliqués à la Radio logicielle.

La problématique est la suivante : toute forme de signal mettant en oeuvre une sommation de porteuses (orthogonales ou non) génère de fait des fluctuations temporelles, qui selon l'occurrence et l'amplitude, peuvent occasionner des distortions sévères au passage d'éléments non linéaires. Ces fluctuations sont le plus souvent désignées sous l'acronyme Peak to Average Power Ratio (PAPR) ou plus généralement Power Ratio (PR) et les non

---

(1). Orthogonal Frequency Division Multiplexing

linéarités sont le plus souvent le fait de l'amplificateur de puissance. Le problème devient alors le suivant : comment amplifier "correctement" un signal à fort PR ?

Historiquement, les préoccupations liées à une "bonne amplification de puissance" remontent aux premières heures de la transmission radio. En effet, avec l'invention de l'amplificateur en 1906 par De Forest (1873-1961) [1] (appelé "triode"), la radiodiffusion connaît un essor important jusque dans les années 1920 marquées par les premières émissions radiophoniques. A la même époque l'ingénieur américain Harold S. Black travaille sur la transmission du téléphone sur câble. Voici le cheminement de sa pensée :

*"In 1921, the major task at the Western Electric Company's old West Street laboratories in New York City was to improve the Bell System's new open-wire telephone system. I discovered that the system's push-pull repeater amplifiers were a major source of trouble. No one knew how to make amplifiers linear or stable enough in those days, and consequently they were subject to an intolerable amount of distortion. Starting from 1921 and during the next two years, I spent many weekends and evenings reading all I could about the unwanted generation of products. At 2 a.m. of March 17, 1923 I restated my own problems as follows : Remove all distortion products from the amplifier output. In doing this, I was accepting an imperfect amplifier and regarding its output as composed of what was wanted plus what was not wanted. I immediately observed that by reducing the output to the same amplitude as the input, and subtracting one from the other, only the distortion would remain. The distortion could then be amplified in a separate amplifier and used to cancel out the distortion in the original amplifier output. "*

La première technique de linéarisation des amplificateurs était née. Elle est brevetée en 1928. C'est la technique du feed-forward [2]. Celle-ci a été longtemps ignorée jusque dans les années 1960, au profit de la technique dite du "feedback". Il aura en effet fallu attendre 1968 pour voir une première application de la technique du feed-forward par Seidel des Bell Laboratories : la linéarisation d'amplificateur VHF nécessitant une très forte linéarité [3]. Plus récemment, cette technique a été appliquée aux communications militaires dans la bande HF (1982) [4], à la linéarisation des amplificateurs de télévision par câble (1988) [5], à la télévision par satellite (1986)[6] et enfin aux systèmes radio cellulaires (station de base et mobile) (1988)[7].

Neuf ans après le brevet sur la méthode du "feedforward", Black dépose à nouveau un brevet sur la méthode dite du "feedback" (1937)[8]. Seidel (1968) et Wood (1971) en ont proposé des variantes (respectivement direct-feedback [9] et indirect feedback [10]). Il a fallu ensuite attendre 1979 puis 1983 pour voir apparaître les premières applications de cette technique à des systèmes de téléphonie HF par bande latérale unique (BLU<sup>(2)</sup>) [11], [12]. Plus récemment, cette technique (sous une version "cartesian loop") a été proposée comme solution de linéarisation dans le système TETRA<sup>(3)</sup> [13]. En effet, la modulation utilisée est une  $\frac{\pi}{4}$  - DQPSK filtrée (filtre en racine de cosinus surélevé de roll off 0.35) à enveloppe non constante, nécessitant une caractéristique très linéaire de l'amplificateur.

---

(2). Bande Latérale Unique

(3). Trans European Trunked Radio

A ces deux techniques de linéarisation (feedback et feedforward), il faut ajouter toutes les techniques de prédistortions. Les premières applications ont vu le jour dans les années 80, essentiellement pour des applications de transmission par satellite. Les versions numériques sont aujourd'hui largement étudiées.

Trois techniques sont donc utilisées pour linéariser un amplificateur (feedback, feedforward et prédistortion). Cependant, il faut bien garder à l'esprit que, malgré la linéarisation, le rendement de l'amplificateur n'est pas modifié, rendement que l'on cherche aussi à rendre maximum.

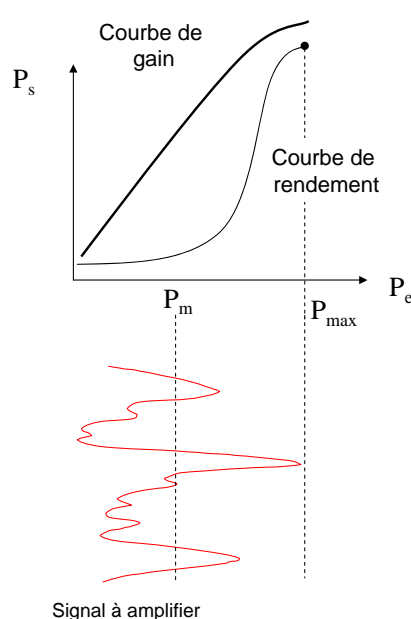


FIGURE 1.1 – Illustration du rendement et du gain de l'amplificateur

Comme illustré sur la Fig.1.1, les signaux à amplifier ne sont pas toujours à enveloppe constante. Ils présentent donc en général un écart entre leur maximum et leur moyenne. Cet écart sera dénommé facteur de crête en français, PR (Power Ratio) ou PAPR (Peak to Average Power Ratio) en anglais. Des signaux à forts PR devront donc être amplifiés avec un certain recul afin d'éviter une amplification au delà de la saturation de l'amplificateur. Dans ce cas, l'amplification aura lieu dans une zone où le rendement est faible, voire très faible. A l'opposé, des signaux à faibles PR pourront être amplifiés très près de la saturation, là où le rendement est maximum. Il est donc clair que les approches de linéarisation de l'amplificateur et de réduction de PR sont complémentaires.

La forme d'onde joue donc un rôle primordial dans l'opération d'amplification. On distingue alors deux catégories de forme d'onde : les formes d'onde dites "monoporteuse" et les formes d'onde dites "multiporteuse".

Les formes d'onde "monoporteuse" ont été historiquement les premières à avoir été normalisées dans les standards de télécommunications et des solutions ont été proposées pour en limiter le PR. Ainsi, le standard *IS* – 54 aux Etats-Unis a normalisé en 1992 une modulation  $\frac{\pi}{4}$  – *DQPSK* <sup>(4)</sup> filtrée (roll off de 0.35), limitant les sauts de phase à  $\pm \frac{3\pi}{4}$ . Le PR de cette forme d'onde est de l'ordre de  $3.87dB$  <sup>(5)</sup>, c'est à dire  $0.5dB$  de moins que la *QPSK* <sup>(6)</sup> classique, filtrée de la même manière. Il en est d'ailleurs de même pour le système TETRA européen (couplé comme vu plus haut avec une technique de linéarisation de type "cartesian loop") et le PDC/PHS <sup>(7)</sup> au Japon. Dans cette logique, le standard *IS* – 95 normalise aux Etats-Unis en 1995 une modulation *OQPSK* <sup>(8)</sup> de PR  $3dB$ , limitant ainsi les sauts de phase à  $\pm \frac{\pi}{2}$ .

Pour des raisons identiques, le GSM <sup>(9)</sup>, système européen de téléphonie mobile de deuxième génération normalise en 1993 une modulation *GMSK* <sup>(10)</sup> de PR  $0dB$  <sup>(11)</sup>. L'évolution des débits impose alors une migration du GSM vers EDGE <sup>(12)</sup>, ce dernier reposant sur une modulation  $8 - PSK$  dont une porteuse présente un PR de  $3.3dB$ .

Les télécommunications du milieu des années 90 voient ensuite apparaître la modulation OFDM comme base pour les diffusions audio et vidéo en Europe. L'OFDM est une forme d'onde multiporteuse, en "opposition" aux formes d'onde monoporteuse, en tout cas du point de vue du PR. Aujourd'hui la plupart des systèmes de communications numériques haut-débits reposent sur l'OFDM (réseaux locaux sans fil, télévision numérique terrestre et mobile, quatrième génération de mobiles, ...). Comme expliqué plus haut, le PR est bien plus important qu'en monoporteuse. Ainsi, les études pour diminuer le PR en OFDM ont débuté vers le début des années 90. Bien conscients du problème du PR de l'OFDM, les ingénieurs de l'époque l'avaient alors esquivé en sur-dimensionnant les amplificateurs de puissance ou (ce qui est équivalent) en amplifiant le signal dans la zone linéaire de l'amplificateur en imposant alors au signal OFDM un recul important. Ces solutions étant sous optimales, elles ont alors véhiculé une foison de recherches visant à :

- décrire mathématiquement le PR
- proposer des solutions efficaces pour diminuer le PR et/ou améliorer la linéarité de l'amplificateur de puissance.

Dans la foulée, un nombre important de travaux sont allés dans le sens des deux directions citées ci-dessus. Van Nee (statistique du PAPR) [14], Li et Cimini (méthode du clipping/filtrage) [15], Muller ou Huber (méthodes du SLM et PTS) [16], [17] et bien

---

(4). Differential Quadrature Phase Shift Keying

(5). toutes les valeurs de PR sont données ici pour des signaux en bande de base

(6). Quadrature Phase Shift Keying

(7). Personal Data Communications system / Personal Handy-phone System

(8). Offset Quadratic Phase Shift Keying

(9). Global System for Mobile communications

(10). Gaussian Minimum Shift Keying

(11). Valeur du PR d'une porteuse GSM en bande de base

(12). Enhanced Data Rates for GSM Evolution

d'autres encore ont largement contribué à initier dans les années 1996/97 une thématique qui est aujourd'hui incontournable dans les modulations multiporteuse.

C'est dans ce contexte que débute ma thèse en 1997 à SUPELEC dans l'équipe ETSN<sup>(13)</sup> du Campus de Rennes (équipe devenue ensuite SCEE<sup>(14)</sup>). Davis et Jedwab viennent alors de publier un article dans *Electronics Letters* mettant clairement en lien les codes de Reed-Müller et la réduction du PR [18]. C'est donc dans cette direction que j'ai travaillé lors de ma thèse de doctorat. Malgré un intérêt évident pour un faible nombre de porteuses, la méthode est difficilement adaptable lorsque le nombre de porteuses dépasse 64 du fait du faible taux de codage résultant.

Nos études se sont ensuite concentrées sur diverses méthodes de réduction des non linéarités ou du PR : par réseaux de neurones (thèse de Sylvain Tertois), en ajoutant des porteuses dédiées (thèse de Sidkiéta Zabré et post-doc d'Irène Mahafeno), par clipping filtrage innovant (thèse de Désiré Guel, thèse de Salvatore Ragusa, post-doc d'Alexandre Skrzyzack), en extrapolant à des contextes autres que l'OFDM (MIMO<sup>(15)</sup> pour la thèse de Basel Rihawi), Radio logicielle (pour la thèse de Sajjad Hussain). En parallèle de ces travaux, des développements analytiques du PR ont été proposés : pour des modulations monoporteuse (thèse de Basel Rihawi), pour une équivalence fréquentielle du PR (thèse de Sajjad Hussain), pour la généralisation des méthodes d'ajout de signal (thèse de Désiré Guel).

Ces travaux se sont inscrit dans des contextes divers : projets collaboratifs (régionaux, nationaux ou européens) mais aussi projets bilatéraux avec des industriels soucieux d'intégrer dans leurs équipements des traitements visant à réduire le PR. La problématique du PR est donc devenue en une dizaine d'année une préoccupation importante des industriels du fait de l'application de l'OFDM dans un nombre très large de standards. La transmission de connaissances entre le monde académique et industriel est alors un élément important. Deux exemples illustrent parfaitement cet état de fait.

Le premier concerne la future norme de télévision numérique terrestre (DVB-T2)<sup>(16)</sup>. La norme prévoit en effet que des porteuses soient spécifiquement optimisées pour réduire le PR, comme cela a été initialement proposé par Tellado en 1999 [19] dans sa thèse de doctorat.

Le deuxième concerne la norme de télévision sur mobile DVB-H<sup>(17)</sup>. Une collaboration entre SUPELEC et une PME rennaise a permis d'identifier une méthode de la littérature de réduction de PR qui est maintenant implémentée dans les modulateurs vendus par cette société.

---

(13). *Electronique Traitement du Signal Neuromimétisme*

(14). *Signal Communication Electronique Embarquée*

(15). *Multi Input Multi Output*

(16). *Digital Video Broadcasting - Terrestrial, version 2*

(17). *Digital Video Broadcasting - Handheld*



En parallèle de ces travaux sur le PR, j'ai été aussi amené à développer plus récemment une autre activité de recherche liée à la radio logicielle. L'objectif est d'optimiser la réalisation d'un terminal multistandard en cherchant des ressemblances entre traitements. Cette voie d'étude nommée *paramétrisation* constitue une activité importante dans l'équipe SCEE. J'ai alors dans ce contexte encadré une thèse (celle d'Ali Al Ghouwayel) dont l'objectif était de réaliser une FFT reconfigurable, capable sur une même architecture d'effectuer des transformées de Fourier dans  $\mathbb{C}$  et dans les corps de Galois. Cette activité fait l'objet actuellement d'une collaboration entre SUPELEC et d'autres acteurs du domaine dans le cadre du projet ANR INFOP<sup>(18)</sup>. Une autre proposition sur cette thématique a été déposée cette année auprès de l'ANR. En parallèle de cela, une thèse en co-tutelle avec une Université libanaise est prévue à la rentrée 2009. J'en serais le co-encadrant pour SUPELEC.

Ces travaux sur la radio logicielle ne reflétant pas depuis ma soutenance de thèse la majorité de mes activités de recherche, j'ai donc décidé que le document se focalise principalement sur le facteur de crête, d'où son titre. Cependant, cette nouvelle activité concernant plus spécifiquement la radio-logicielle a déjà apporté des résultats très intéressants et je ne pouvais pas ne pas en parler.

Le présent document se décompose ainsi en trois chapitres. Le chapitre 2 synthétise l'ensemble de mes activités de recherche. Le chapitre 3 présente l'ensemble de mes contributions de recherche, tant sur le plan du facteur de crête que sur celui de la paramétrisation et le chapitre 4 regroupe les articles majeurs ayant été publiés au cours de mes travaux de recherche.

---

(18). INFrastructure OPportuniste

## Chapitre 2

# Synthèse des activités de recherche

### 2.1 Curriculum vitae

#### 2.1.1 Présentation du candidat

- Prénom : Yves
- Nom : LOUËT
- Date et lieu de naissance : le 4 Juillet 1973 à Quimperlé (Finistère)
- Nationalité : française
- Situation familiale : marié, 2 enfants
- Fonction : Enseignant-chercheur à SUPELEC
- Equipe de recherche : Signal Communication Electronique Embarquée (SCEE) du Campus de Rennes. Groupe AC de l'Institut de Télécommunications et d'Electronique de Rennes (IETR), UMR 6164 du CNRS.

#### 2.1.2 Formation

- 1997-2000 : Thèse de Doctorat de l'Université de Rennes 1 effectuée à SUPELEC, Campus de Rennes. Thèse soutenue le 08 Octobre 2000.
- 1996-1997 : Scientifique du contingent au Laboratoire Radiocommunications de l'Université de Rennes 1
- 1995-1996 : Formation de DEA à l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille (ENSPM)
- 1993-1996 : Ecole d'Ingénieur ISITV (Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var)
- 1991-1993 : Classes préparatoires aux Grandes Ecoles

#### 2.1.3 Diplômes

- 2000 : Docteur de l'Université de Rennes 1, mention Très Honorable
- 1996 : Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) "Optique-Signal-Image" de l'Université de Toulon et de l'Ecole Nationale Supérieure de Physique de Marseille (ENSPM)
- 1996 : Diplôme d'Ingénieur de l'ISITV - Option "Télécommunications"
- 1991 : Baccalauréat, série C

### 2.1.4 Parcours professionnel

- Novembre 2000-Septembre 2002 : Ingénieur de recherche à SIRADEL SA (Rennes)
- Depuis Septembre 2002 : Enseignant-chercheur à SUPELEC, Campus de Rennes

### 2.1.5 Bilan de la production scientifique

- 2 rédactions de chapitres d'ouvrages collectifs
- 7 publications dans des revues internationales avec comités de lecture
- 4 brevets
- 31 publications dans des congrès internationaux avec comités de lecture
- 6 publications dans des congrès nationaux avec comités de lecture
- 2 mémoires de recherche
- 13 rapports techniques de projets nationaux et internationaux

### 2.1.6 Bilan des encadrements de recherche

- 7 co-encadrements de thèse (dont deux doivent être soutenues à la rentrée 2009)
- 3 encadrements de post-doctorants
- 6 encadrements de stages de recherche et de fin d'études (Master 2, DEA, CNAM, Ingénieurs)
- 4 participations à des jurys de thèse

### 2.1.7 Bilan des activités internationales

- 3 organisations de sessions spéciales dans des conférences internationales
- 2 exposés de recherche (tutorials) dans des conférences internationales
- 1 présidence de session dans une conférence internationale
- Membre de Comités Techniques de 8 conférences internationales
- Responsable pour l'équipe SCEE du projet NEWCOM (2004 et 2005)
- Participation au WP2 du projet européen B21C

### 2.1.8 Bilan des activités nationales

- Responsable scientifique pour SIRADEL de 3 projets RNRT et d'un projet collaboratif avec Mitsubishi ITE
- Responsable scientifique pour SUPELEC d'un projet ANR
- Responsable scientifique pour SUPELEC d'un projet PME du Pôle Images et Réseaux
- Responsable scientifique d'un projet fédérateur, commun aux 3 campus de SUPELEC
- Co-responsable scientifique pour l'Université de Rennes 1 d'un projet DGA dans le cadre du service militaire

## 2.2 Résumé de ma thèse de Doctorat

Ma thèse de Doctorat s'est déroulée dans l'équipe ETSN (Electronique Traitement du Signal et Neuromimétisme) entre Septembre 1997 et Octobre 2000.

Sujet : Performance des codes de Reed-Müller pour la réduction du facteur de crête dans les modulations OFDM

Directeur de thèse : Jacques Citerne

Jury : Ramesh Pyndhia et Hikmet Sari (rapporteurs), Alain Bourdillon, Ghaïs El-Zein, M'Hamed Drissi et Annick Le Glaunec (examineurs), Jean-François Héliard et Michel Mathieu (membres invités).

Mention : Très Honorable

## 2.3 Résumé de l'activité d'enseignement

Mon activité d'enseignement concerne uniquement SUPELEC que cela soit pour la formation initiale ou continue. La formation initiale se décline entre les trois années de formation d'ingénieur. Le nombre d'heures présenté est celui effectivement passé devant les élèves, sans aucune équivalence TD.

### 2.3.1 Enseignement en tronc commun (Première et Deuxième année)

- Coordinateur des séances de Travaux Pratiques de traitement du signal en Première année : 45h/an
- Travaux Dirigés de Traitement du Signal aléatoire en Deuxième année (6h/an)
- Cours de tronc commun de Signal et Communication en Deuxième année (18h/an)
- Travaux Dirigés de Signal et Communication en Deuxième année (6h/an)
- Encadrements de projets d'élèves : 2 à 3/an

### 2.3.2 Enseignement en Troisième année

- Cours de modélisation du canal de propagation en option ECS<sup>(1)</sup> : 4.5h/an
- Travaux Dirigés de Modulations numériques en option ECS : 6h/an
- Cours de codage de canal en option ECS : 9h/an
- Cours de codage de canal en option SPC<sup>(2)</sup> : 12h/an
- Encadrement de projets d'élèves de l'option ECS : 1/an

### 2.3.3 Enseignement en Formation Continue

- Responsable de la formation continue sur l'amplification non linéaire de signaux à forts PAPR
- Intervention dans la formation de SUPELEC sur la télévision numérique : 4h/an
- Intervention dans la formation de SUPELEC sur l'OFDM/MC-CDMA : 2h/an
- Intervention dans la formation de SUPELEC sur la Radio Logicielle et Intelligente : 3h/an

---

(1). Electronique Communications Systèmes, Campus de Rennes

(2). Systèmes Photoniques et de Communications, Campus de Metz

## 2.4 Compétences techniques et activités d'expertise

Mes activités de recherche se concentrent sur le développement d'algorithmes de traitements du signal et de communications numériques pour les télécommunications. Les domaines d'application sont :

*Le problème du facteur de crête (PAPR ou PR en anglais) :*

- description analytique pour tout type de modulation (mono et multiporteuse) et dans tout type de contexte (mono et multistandard)
- développement de méthodes de réduction du facteur de crête dans tous les contextes cités ci-dessus
- établissement des performances dans les normes actuelles (WiFi <sup>(3)</sup>, DVB-T <sup>(4)</sup>, DVB-T2 <sup>(5)</sup>, SWR <sup>(6)</sup>)

*Algorithmes de communications numériques :*

- modulation multiporteuse
- codage de canal

*La radio logicielle :*

- recherche d'opérateurs communs reconfigurables
- identification de bandes libres pour l'accès opportuniste au spectre

## 2.5 Encadrement d'activités de recherche

### 2.5.1 Encadrements de thèses

#### 2.5.1.1 Thèse de Sylvain Tertois

- Titre : Réduction des effets des non linéarités dans une modulation multiporteuse à l'aide de réseaux de neurones
- Date de soutenance : 12 Décembre 2003
- Mention : Très Honorable
- Université : Rennes 1
- Directeur de thèse : Olivier Bonnaud
- Encadrants : Gilles Vaucher (33%), Annick Le Glaunec (33%) et Yves Louët (33%)
- 1 publication avec l'auteur dans le cadre de la thèse ([30])

---

(3). standard de diffusion haut débit

(4). Digital Video Broadcasting-Terrestrial : norme actuelle de diffusion numérique terrestre de la télévision

(5). future norme de télévision numérique terrestre

(6). SoftWare Radio

**2.5.1.2 Thèse de Thomas Ta**

- Titre : Implémentation sur FPGA d'un turbo codeur-décodeur en blocs à haut débit avec une faible complexité
- Date de soutenance : 8 Décembre 2003
- Mention : Très Honorable
- Université : Rennes 1
- Directeur de thèse : Jacques Citerne
- Encadrant à Mitsubishi ITE : Nadine Chapalain
- Encadrants à SUPELEC : Annick le Glaunec et Yves Louët

**2.5.1.3 Thèse de Sidkiéta Zabré**

- Titre : Amplification non linéaire d'un multiplex de porteuses modulées à fort facteur de crête
- Date de soutenance : 26 avril 2007
- Mention : Très Honorable
- Université : Rennes 1
- Directeur de thèse : Jacques Palicot
- Encadrants : Jacques Palicot (70%) et Yves Louët (30%)
- 8 publications avec l'auteur dans le cadre de la thèse ([26], [31], [34], [32] [44], [45], [46], [47])

**2.5.1.4 Thèse d'Ali Al Ghouwayel**

- Titre : Contribution à l'étude de l'opérateur commun FFT dans le contexte de la radio logicielle : application au codage de canal
- Date de soutenance : 27 Mai 2008
- Mention : Très Honorable
- Université : Rennes 1
- Directeur de thèse : Jacques Palicot
- Encadrants : Yves Louët (70%) et Jacques Palicot (30%)
- 6 publications avec l'auteur dans le cadre de la thèse ([40], [41], [42], [48], [49], [50] et [43])

**2.5.1.5 Thèse de Basel Rihawi**

- Titre : Analyse et réduction du Power Ratio des systèmes de radiocommunications multi-antennes
- Date de soutenance : 20 Mars 2008
- Mention : Très Honorable
- Université : Rennes 1
- Directeur de thèse : Jacques Palicot
- Encadrants : Yves Louët (70%) et Jacques Palicot (30%)
- 6 publications avec l'auteur dans le cadre de la thèse ([22], [23], [33], [47], [51], [52])

**2.5.1.6 Thèse de Sajjad Hussain**

- Titre : Power Ratio analysis for Cognitive Radio systems

- Soutenance prévue à l’automne 2009
- Université : Rennes 1
- Directeur de thèse : Jacques Palicot
- Encadrants : Yves Louët (70%) et Jacques Palicot (30%)
- 9 publications avec l’auteur dans le cadre de la thèse ([24], [25], [26], [53], [54], [56], [60], [61], [62])

#### 2.5.1.7 Thèse de Désiré Guel

- Titre : Etudes de techniques de réduction du facteur de crête en émission
- Soutenance prévue à l’automne 2009
- Université : Rennes 1
- Directeur de thèse : Jacques Palicot
- Encadrants : Jacques Palicot (70%) et Yves Louët (30%)
- 3 publications avec l’auteur dans le cadre de la thèse ([37], [46], [55])

### 2.5.2 Encadrements de post-doctorants

#### 2.5.2.1 Post-doctorat d’Irène Mahafano

- Sujet d’étude : Application des méthodes d’ajout de signal à la réduction de PAPR pour la télévision numérique terrestre de deuxième génération (DVB-T2)
- Contexte : projet collaboratif européen CELTIC B21C<sup>(7)</sup>
- Durée : 24 mois (de Juin 2007 à Juin 2009)
- Encadrants : Yves Louët (90%) et Jean-François Hélard (10%)
- 4 publications avec l’auteur dans le cadre du post-doctorat ([35], [57], [58] et [59])

#### 2.5.2.2 Post-doctorat d’Alexandre Skrzypczak

- Sujet d’étude : Développement de méthodes de réduction de PAPR pour les applications DVB-H et DRM<sup>(8)</sup>
- Contexte : projet collaboratif AMONT<sup>(9)</sup> du Pôle Images et Réseaux
- Durée : 18 mois (de Janvier 2008 à Juin 2009)
- Encadrant : Yves Louët (100%)
- 1 soumission avec l’auteur dans le cadre du post-doctorat ([38])

#### 2.5.2.3 Post-doctorat d’Hongzhi Wang

- Sujet d’étude : Etude et développement d’opérateurs reconfigurables
- Contexte : projet collaboratif ANR INFOP
- Durée : 18 mois (de Février 2009 à Août 2010)
- Encadrant : Yves Louët (100%)

---

(7). Broadcast for the 21th Century

(8). Digital Radio Mobile

(9). Adaptation de Modulation OFDM face aux Non-linéarités des Transmetteurs

### **2.5.3 Encadrements de stages**

#### **2.5.3.1 Stage d'Ingénieur de Boris Le Labousse**

- Titre : Audit technique des outils de planification radio UMTS
- Date de soutenance : 23 Juin 2001
- Ecole : ESIEE de Marne la Vallée
- Encadrant : Yves Louët (100%)

#### **2.5.3.2 Stage d'Ingénieur d'Hervé Breton**

- Titre : Etude et réalisation d'une passerelle ADSL, Ethernet et courants porteurs
- Date de soutenance : 30 Janvier 2003
- Ecole : CNAM de Rennes
- Encadrants : Société LEA (33%), Fabienne Nouvel (33%) et Yves Louët (33%)

#### **2.5.3.3 Stage de DEA d'Amin Youb**

- Titre : Transmission numérique sur courants porteurs : étude conjointe de la démodulation et de la récupération de porteuses
- Date de soutenance : 30 Septembre 2003
- DEA STIR, Université de Rennes 1
- Encadrant : Yves Louët (100%)

#### **2.5.3.4 Stage de DEA de Mohamed Ghazzi**

- Titre : Intérêt des techniques de paramétrisation pour les architectures radio-logicielles reconfigurables
- Date de soutenance : 24 Juin 2004
- DEA Electronique, Université de Rennes 1
- Encadrant : Yves Louët (100%)

#### **2.5.3.5 Stage de Master Recherche de Steredenn Daumont**

- Titre : Etude de l'influence de la fonction de filtrage sur le PAPR
- Date de soutenance : 21 Juin 2006
- Master STI, Université de Rennes 1
- Encadrant : Yves Louët (100%)

#### **2.5.3.6 Stage de Master Recherche de Sidi Issa Ahmedou**

- Titre : Etude fréquentielle du PAPR
- Date de soutenance : prévue en Juillet 2009
- Master Sciences et Technologies (SISEA), Université de Rennes 1
- Encadrant : Yves Louët (100%)

#### **2.5.3.7 Stage de Master Recherche de Patricia Kaiser**

- Titre : Théorie des graphes pour la radio logicielle et la paramétrisation
- Date de soutenance : prévue en Juillet 2009



- Master de Mathématiques, Université Libanaise, Beyrouth
- Encadrants : Yves Louët (50%) et Amine El Sahili (50%)

## 2.6 Participation à des jurys de thèse en qualité d'examinateur

- Jury de la thèse de Sylvain Tertois (12 Décembre 2003)
- Jury de la thèse de Sidkiéta Zabré (26 avril 2007)
- Jury de la thèse de Basel Rihawi (20 Mars 2008)
- Jury de la thèse d'Ali Al Ghouwayel (27 Mai 2008)

## 2.7 Animation de la recherche

### 2.7.1 Organisation de sessions spéciales dans des conférences internationales

L'organisation de sessions spéciales implique la proposition de la thématique envers le comité d'organisation, la responsabilité du processus de sélection des articles et la présidence de la session lors de la conférence.

*Conférence IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT) 2006*

- Date et lieu de la conférence : Septembre 2006 à Vancouver
- Thème de la session spéciale : Peak to Average Power Ratio of a Multiplex of Modulated Carriers
- Nombre d'articles présentés lors de cette session spéciale : 5

*Conférence European Wireless (EW) 2007*

- Date et lieu de la conférence : Mars 2007 à Paris
- Thème de la session spéciale : PAPR mitigation in OFDM
- Nombre d'articles présentés lors de cette session spéciale : 5

*Conférence de l'Union des Radio Sciences Internationales (URSI) 2008<sup>(10)</sup>*

- Date et lieu de la conférence : Août 2008 à Chicago
- Thème de la session spéciale : Signal Processing for Software radio systems
- Nombre d'articles présentés lors de cette session spéciale : 5

---

(10). Cette session spéciale a été co-organisée avec Jacques Palicot, ce dernier ayant présidé la session sur place

### 2.7.2 Tutoriels dans des conférences internationales

*Conférence IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT) 2007*

- Date et lieu de la conférence : Décembre 2007 au Caire
- Thème du tutorial : PAPR mitigation and linearity enhancement methods : an overview and a classification
- Nombre estimé de participants : une vingtaine

*Conférence IEEE International Symposium on Wireless Communications and Systems (ISWCS) 2008*

- Date et lieu de la conférence : Octobre 2008 à Reykjavik
- Thème du tutorial : Recent advances in PAPR reduction methods for multicarrier signals
- Nombre estimé de participants : une vingtaine

### 2.7.3 Présidences de sessions dans des conférences internationales

*Conférence ICT 2006 (International Conference on Telecommunications)*

- Date et lieu de la conférence : Mai 2006, Madère, Portugal
- Thème de la session : Codage de canal (Mercredi 10 Mai 2006)
- Nombre de papiers présentés : cinq

### 2.7.4 Reviewers d'articles de revues et de conférences internationales

#### 2.7.4.1 Revues internationales

- IEEE Transaction on Wireless Communications
- IEEE Signal Processing Letters
- IET Communications
- International Journal on Communication Systems
- EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking
- Signal Processing International Journal

#### 2.7.4.2 Comités techniques de conférences (TPC)

- IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) (2007 et 2008)
- European Wireless (EW) (2007, 2008 et 2009)
- IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) (2007)
- International Conference on Wireless and Mobile Communications (ICWMC) (2008 et 2009)

### 2.7.5 Animation de la recherche au niveau national

- Animateur du séminaire SCEE de SUPELEC depuis le début 2009
- Membre du Comité Technique d'Axe (CTA)/Axe 2 du Pôle Images et Réseaux

## 2.8 Projets collaboratifs

### 2.8.1 Projets internationaux

J'ai participé au réseau d'excellence NEWCOM entre 2004 et 2005. Mon implication dans le projet européen B21C est toujours en cours.

#### *Réseau européen d'excellence NEWCOM*

- Responsable pour SCEE entre 2004 et 2005
- Participation au WP4 et Département D
- Contribution de SUPELEC : architectures reconfigurables

NEWCOM (Network of Excellence in Wireless COMMunications) est un réseau européen qui fédère un nombre important d'académiques et d'industriels du domaine des télécommunications. L'objectif de ce réseau est d'être une force de proposition dans la thématique "Mobile and wireless systems beyond 3G".

#### *Projet européen CELTIC B21C*

- Participation au WP2 (Task Force 209) de 2007 à 2009
- Contribution de l'IETR/SUPELEC : apport des techniques de réservations de porteuses pour réduire le PAPR dans la future norme de télévision numérique
- Co-responsabilité avec Jean-François Héland pour l'IETR de la TF 209

L'objectif du projet B21C est d'être une force de proposition pour le forum DVB dans la définition des futures normes de télévision numérique (terrestre, mobile et satellite). Il y a 36 partenaires, académiques et industriels européens du secteur, parmi lesquels on peut citer Teamscast, la BBC, NXP, Telecom Bretagne, l'IETR, Alcatel, Thomson, TDF, Telefonica, la RAI, NOKIA, ...

### 2.8.2 Projets nationaux

Ma participation à des projets nationaux a couvert l'ensemble de mon expérience professionnelle depuis mon service militaire jusqu'à aujourd'hui. Ils sont classés par ordre chronologique.

#### *Projet MOSAR*<sup>(11)</sup>

- Participation au sous projet dédié à la réalisation matérielle du RADAR et phases de test (1996-1997)

---

(11). Maquette Orientée pour un Système d'Analyse de Résonances

- Co-responsable pour l'Université de Rennes 1 avec Alain Bourdillon, Christian Brousseau et Arnaud David.

Ce projet avait pour objectifs la définition, la réalisation et l'expérimentation d'un RADAR multifréquence et multipolarisation dans la gamme 20-100 MHz. Les partenaires étaient : l'IRISA, l'Université de Rennes 1, DASSAULT, l'Université de Nantes, la DRET, l'ONERA et THOMSON.

### ***Projet RNRT COMMINDOR***<sup>(12)</sup>

- Participation au sous projet 2 dédié à la définition des modèles de propagation des ondes radio à 60 GHz dans des milieux indoor.
- Responsable pour SIRADEL entre 2000 et 2002

Le projet COMMINDOR a eu pour objectif l'étude des nouveaux systèmes de radio-communication sans fil à très haut débit (>100 Mbits/s) dans la bande des 60 GHz en environnement indoor domestique. Les partenaires étaient THOMSON, l'IEMN, France Telecom R&D, l'INSA de Rennes, Thalès, CEA-LETI, SIRADEL et LITHOS.

### ***Projet RNRT ERASME***<sup>(13)</sup>

- Participation au sous projet 2 sur la définition des modèles de propagation à 40 GHz en milieu rural
- Responsable pour SIRADEL entre 2001 et 2002

Le projet ERASME avait pour but de déployer un réseau LMDS<sup>(14)</sup> à 40 GHz sur la technopôle de Limoges. Il y avait 13 partenaires dont le CREAPE Ingénierie, l'Université de Limoges, SIRADEL, Thomson, l'INT, France Telecom R&D.

### ***Projet RNRT ERMITAGES***<sup>(15)</sup>

- Participation au sous projet 2 dédié à la modélisation du canal MIMO pour l'UMTS<sup>(16)</sup> en mode TDD<sup>(17)</sup>
- Responsable pour SIRADEL entre 2001 et 2002

Le projet ERMITAGES avait pour but d'étudier la faisabilité du concept BLAST (MIMO haut débit) pour le mode TDD de l'UMTS. Les partenaires étaient Philips, France Telecom R&D, SIRADEL et EURECOM.

---

(12). Communications millimétriques courtes portées et haut débit. Application aux futurs réseaux domestiques pour les services multimédia

(13). Evaluation de Réseau d'Accès Sans fil Multimedia en EHF

(14). Local Multipoint Distribution Service

(15). Emetteur Récepteur Multicapteurs pour des Transmissions A Grandes Efficacités Spectrales

(16). Universal Mobile Telecommunications System

(17). Time Division Duplex

***Projet ANR INFOP<sup>(18)</sup>***

- Participation aux lots 4 et 5 sur la recherche d'opérateurs communs dans un contexte radio logicielle
- Responsable pour SUPELEC (2008-2010)

Le projet INFOP a pour objectif de montrer la faisabilité d'une transmission de type WiFi/WiMax dans les bandes libérées par la télévision analogique. Les partenaires sont le CEA, EADS, Teamcast et SUPELEC.

***Projet du Pôle Images et Réseaux AMONT<sup>(19)</sup>***

- Participation au lot 1 sur la recherche de solutions visant à réduire le PAPR pour le DRM<sup>(20)</sup> et le DVB-H
- Responsable pour SUPELEC (2008-2009)

L'objectif du projet AMONT est de définir, tester et implémenter des solutions de réduction de PAPR et de linéarisation pour les standards DRM et DVB-H. Les partenaires sont Teamcast, Digidia, SUPELEC et Louis de Broglie.

## 2.9 Projets bilatéraux

***Projet DYNAMO***

- Partenaire industriel : Mitsubishi IET (Rennes)
- Responsable pour SIRADEL en 2001

L'objectif du projet DYNAMO était d'intégrer des modèles de propagation radio réalistes dans un outil de prédiction de trafic 3G.

***Projet - Radio logicielle et PAPR***

- Partenaire industriel : France Telecom R&D (Grenoble)
- Co-responsable pour SUPELEC avec Jacques Palicot
- Durée du projet : 24 mois (2004 et 2005)

L'objectif du projet était d'analyser le PAPR et de proposer des solutions pour le réduire dans le contexte de la radio logicielle.

***Projet bibliographie PAPR***

---

(18). INFrastructure OPportunistes

(19). Adaptation de Modulation OFDM face aux Non-linéarités des Transmetteurs

(20). Digital Radio Mondiale

- Partenaire industriel : ALCATEL ALENIA SPACE (Toulouse)
- Responsable pour SUPELEC
- Durée du projet : 12 mois (2006-2007)

L'objectif de cette collaboration était un état de l'art des méthodes de réduction du PAPR et de linéarisation pour des applications satellites.

## 2.10 Expertise de projets

- Auprès du RNRT (2007)
- Auprès de la Région Nord Pas de Calais (2007)

## 2.11 Production scientifique

Ma production scientifique a débuté pendant ma thèse de doctorat, entre 1997 et 2000. Ensuite, mon arrivée à SUPELEC fin 2002, les encadrements de thésards et de post-doctorants ainsi que mon implication dans un certain nombre de projets ont progressivement abouti à la publication d'articles de conférences, de revues et de chapitres d'ouvrages, fruits de la maturation de mes recherches.

### 2.11.1 Chapitres d'ouvrages collectifs

Yves Louet, Jacques Palicot, Sajjad Hussain "Power Amplification issues related to Dynamic Spectrum Access in the Cognitive Radio Systems", Cognitive Radio Systems ISBN 978-953-7619-25-1, In-Tech, 2009.

Daniel Le Guennec, Christophe Moy, Yves Louet, Jacques Palicot, Renaud Séguier, Pierre Leray, Maor Nafkha, Gilles Tournuer, Renaud Loison, Raphaël Gillard, Merouane Debbah "De la Radio Logicielle à la Radio Intelligente : les challenges techniques", Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Editions Hermès-Lavoisier (réaction en cours).

### 2.11.2 Publications acceptées dans des revues internationales à comités de lecture

Yves Louet and Jacques Palicot "A classification of methods for efficient power amplification of signals" Annals of Telecommunications, vol. 63, Issue 7-8, pp 351-368, July/August 2008

Basel Rihawi and Yves Louet "PAPR Reduction Scheme with SOCP for MIMO-OFDM systems" International Journal of Communications, Network and System Sciences, vol.1, no 1, pp 29-35, Feb. 2008

Jacques Palicot, Yves Louet, Sajjad Hussain, Sidkieta Zabre "Frequency Domain Interpretation of Power Ratio Metric for Cognitive Radio Systems", IET Communications

Journal, vol.2, Issue 6, pp. 783-793, July 2008

Laurent Alaus, Jacques Palicot, Dominique Noguet, Yves Louët, Christian Roland "Promising technique of parametrisation for reconfigurable radio, the Common Operators Technique : fundamentals and examples" Journal of Signal Processing Systems, publication en 2009

Irène Mahafeno, Yves Louët, Jean-François Héland " Peak-to-average power ratio reduction using second order cone programming based tone reservation for terrestrial digital video broadcasting systems", IET Communications Journal, vol. 3, Issue 7, pp. 1250-1261, July 2009

Ali Al Ghouwayel and Yves Louet "FPGA implementation of a re-configurable FFT for multi-standard systems in software radio context", IEEE Trans. On Consumer Electronics Journal, vol. 55, n°2, pp. 950-958, May 2009.

Sufi Tabassum Gul, Ali Al Ghouwayel, Christophe Moy, Yves Louet "A novel design of reconfigurable Fourier Operator over C and GF(Ft) for future multi-standards SDR equipments", International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Inderscience, publication en 2009

### 2.11.3 Brevets

Yves Louet, Desiré Guel, Jacques Palicot, Sidkiéta Zabré, Christian Lereau "Génération d'un signal additionnel et réduction de la dynamique d'un signal de modulation numérique" 0701174 (numéro d'enregistrement national)

Yves Louet, Sidkiéta Zabré, Jacques Palicot, Christian Lereau "Traitement d'un signal de communication avant amplification en modulation mutliporteuse" 0701922 (numéro d'enregistrement national)

Desiré Guel, Jacques Palicot, Yves Louet, "Clipping HSC tenant compte des porteuses non utilisées" 0950895 (numéro d'enregistrement national)

Irène Mahafeno, Jean-François Héland, Yves Louet "Procédé et dispositif de transmission d'un signal multiporteuse utilisant les mêmes porteuses pilotes pour réduire le rapport puissance crête à puissance moyenne" 0952964 (numéro d'enregistrement national)

### 2.11.4 Publications dans des conférences internationales à comités de lecture

*Publication dans le cadre du service militaire de l'auteur en qualité de scientifique du contingent*

C. Brousseau, A. David, Y. Louët, A. Bourdillon, "Multifrequency Polarimetric Radar System in the Low VHF Band", Progress In Electromagnetic Research Symposium,

Nantes, France, July 1998.

***Publications dans le cadre de la thèse de l'auteur***

Y.Louët and A. Le Glaunec, " Peak-factor reduction in OFDM by Reed-Müller channel coding : a new soft decision decoding algorithm " Proceedings of IEEE MELECON 2000, Vol. 2, pp. 872-875, Cyprus, May 2000.

Y.Louët, A. Le Glaunec and P. Leray, " A soft decision decoding of product Reed-Muller and BCH codes for peak factor reduction and error correction in OFDM " Proceedings of IEEE CSCC 2000, Athens, Greece, July 2000.

***Publication à SIRADEL en qualité d'Ingénieur RetD***

Y.Lostanlen, Y. Corre, Y. Louet, Y. Le Helloco, S. Collonge, G. El Zein, G. Zaharia " A new approach for radio propagation modeling in urban environment : Knife-edge diffraction combined with 2D ray-tracing. " VTC'02 Spring conference, Birmingham, England, May 2002.

***Publications à SUPELEC en qualité d'enseignant-chercheur***

S. Tertois, Y. Louët, G. Vaucher, A. Le Glaunec "Réduction des effets des non-linéarités du signal OFDM à l'aide d'un réseau de neurones d'ordre supérieur", Conférence internationale des Sciences Electroniques, Technologies de l'Information et Télécommunications 2003 (SETIT 2003), Tunis

S. Tertois, Y. Louët, S. Tertois, P. Barreau "Reducing non-linear OFDM signal distortions using neural networks in the time domain", Proceedings of ICTTA 04, Damascus, Syria, April 04.

Jacques Palicot, Yves Louët, Stephane Nobilet, Jean-Francois Hélard, Hikmet Sari, "Two Strategies for Reducing Non-Linear Distortions in Multi-Carrier Signals", URSI 05, XI SYMPOSIUM OF RADIO SCIENCE , Poznan, Poland, April 2005.

Jacques Palicot, Yves Louët "Power Ratio definitions and analysis in single carrier modulation", EUSIPCO 05, Antalya, Turkey, September 2005.

Basel Rihawi, Yves Louët "Peak to Average Power Ratio analysis in MIMO systems", ICCTA 06, Damas, Syria, May 2006.

Ali Al Ghouwayel, Yves Louët, Jacques Palicot "A reconfigurable architecture for the FFT operator in a software radio context", ISCLASS 06, Island of Kos, Greece, May 2006

Ali Al Ghouwayel, Yves Louët, Jacques Palicot "A reconfigurable Butterfly for the Fourier and Fermat transforms", WSR 06, Karlsruhe, Germany, March 2006.



S. Ragusa, J. Palicot, Y. Louët and C. Lereau, "Invertible Clipping for Increasing the Power Efficiency of OFDM Amplification", IEEE International Conference on Telecommunications, Madeira island, Portugal, May 2006.

Sidkiéta Zabré, Jacques Palicot, Yves Louët, Christian Lereau "SOCP approach for OFDM peak-to-average power ratio reduction in the signal adding context" , IEEE ISS-PIT 06, Vancouver, Canada, August 2006.

Zabre S, Palicot J, Louët Y, Moy C, Lereau C, "Carrier per Carrier Analysis of SDR signals power ratio", SDR Forum Technical Conference, Orlando, USA, November 2006.

Al Ghouwayel A, Louët Y, Palicot J, "Complexity Evaluation of a Re-Configurable Butterfly with FPGA for Software Radio Systems", PIMRC 07, Athens, Greece, September 2007.

Guel D, Palicot J, Louët Y, "A Geometric Method for PAPR Reduction in a Adding Signal in context for OFDM Signals", International Conference on Digital Signal Processing, DSP 2007, Cardiff, England, July 2007.

Rihawi B, Louët Y, "Gaussian and Flat Rayleigh Fading Channel Influences on PAPR Distribution in MIMO-OFDM Systems", European Wireless Conference, Paris, France, April 2007.

Zabre S, Palicot J, Louët Y, Lereau C, "Reduction of OFDM Peak to Mean Envelope Power Ratio using Ghost Carriers", The Third International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2007, Guadeloupe, French Caribbean, March 2007.

Basel Rihawi, Yves Louët, Sidkiéta Zabré "PAPR Reduction scheme with SOCP for MIMO-OFDM", IEEE WICOM 07, Shanghai, China, September 2007.

Ali Al Ghouwayel, Yves Louët, Amor Nafkha, Jacques Palicot "On the FPGA Implementation of the Fourier Transform over Finite Fields  $GF(2^m)$ " IEEE ISCIT07, Sydney, Australia, October 2007

Yves Louët, Sajjad Hussain "Peak to Mean Power Ratio Statistical Analysis of continuous OFDM signals" IEEE VTC 08, Singapor, May 2008.

Yves Louët, Sajjad Hussain "Peak to Average Power Ratio Analysis of Multi-carrier and Multi-standard signals in software radio context" IEEE ICTTA 08, Damas, Syria, April 2008

Steredenn Daumont, Basel Rihawi, Yves Louet "Root Raised Cosine filter influences on PAPR distribution of single carrier signals" IEEE ISCCSP 08, Malta, March 2008.

Irène Mahafeno, Yves Louët, Jean-François Hélaré "PAPR Reduction Method for OFDM Systems Using Dedicated Subcarriers : A Proposal for the Future DVB-T Stan-

dard", IEEE International Symposium on Broadband multimedia systems and broadcastings (BTS), Las Vegas, NV USA, April 2008.

Louët Y, Hussain S, "Tone Reservation complexity reduction using fast calculation of maximal IDFT element", IEEE/ACM IWCMC 08, Crete Greece, Aug 2008.

Louët Y, Hussain S, "Peak to Average Power Ratio Reduction for Multi-band OFDM System using Tone Reservation", URSI General Assembly 08, Chicago USA, August 2008.

Yves Louet and Ali Al Ghouwayel "FPGA implementation of a reconfigurable FFT for software radio multistandard systems", IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas USA, January 2009.

Yves Louet, Irène Mahafeno, Jean François H  lard "SOCP approach for PAPR reduction using Tone Reservation for the future DVB-T/H standards", 7th IEEE International Workshop on Multi Carrier and Solution (MC-SS), Herrsching, Germany, May 2009.

Sajjad Hussain, Yves Louet, Jacques Palicot "Performance comparison of PRC based PAPR reductions schemes for WiLAN systems", European Wireless Conference , Aalborg, Denmark, May 2009.

Sajjad Hussain and Yves Louet "PAPR reduction of Software Radio signals using PRC method", IEEE Sarnoff Symposium, Princeton, NJ, Mar. 2009.

Sajjad Hussain, Yves Louet, Jacques Palicot "PAPR variations on dynamic spectrum access in Cognitive Radio systems", Wireless Vitae Conference, Aalborg, Denmark, May 2009.

### 2.11.5 Publications dans des conférences nationales à comités de lecture

#### *Publications dans le cadre de la thèse de l'auteur*

Y.Louët, A. Le Glaunec, P. Leray, "Concaténation de séquences complémentaires pour réduire de facteur de cr  te d'un signal OFDM", GRETSI 2001, Toulouse, Septembre 2001.

#### *Publication    SIRADEL en qualité d'Ingénieur RetD*

Y.Lostanlen, Y. Corre, Y. Louet, Y. Le Helloco " Influence de la modélisation de la propagation sur la planification radio des réseaux de 3<sup>  me</sup> génération", Congrès SEE Propagation du décamètre à l'Angstrom, Rennes, Mars 2002.

Y. Corre, Y.Lostanlen, Y. Louet, Y. Le Helloco, "Evaluation des performances des modèles de propagation déterministes en milieu urbain", Congrès SEE Propagation du décamètre à l'Angstrom, Rennes, Mars 2002.

### ***Publications à SUPELEC en qualité d'enseignant-chercheur***

Jacques Palicot, Yves Louët, "Synthèse de la notion de facteur de crête et application aux modulations monoporteuses", GRETSI 2005, Louvain la Neuve, Belgique, Septembre 2005.

Rihawi B, Louët Y, "Influence des canaux Gaussien et de Rayleigh sur la distribution du PAPR dans les systèmes MIMO-OFDM", GRETSI 2007, Troyes, Septembre 2007.

Guel D, Palicot J, Louët Y, Zabre S "Réduction du PAPR par Ajout de signal Artificiel hors bande dans un contexte de signaux mutliporteuses", GRETSI 2007, Troyes, Septembre 2007.

#### **2.11.6 Mémoires de recherche**

Yves LOUËT "Performance des codes de Reed-Müller pour la réduction du facteur de crête dans les modulations OFDM", Thèse de Doctorat, Université de Rennes 1, Octobre 2000.

Yves LOUËT "Etude et conception des codes de calcul pour le traitement de signaux neutroniques selon la méthode de l'analyse des corrélations temporelles", Rapport de stage de DEA, Septembre 1996.

### **2.12 Rapports d'études**

#### **2.12.1 Rapports dans le cadre de projets collaboratifs européens**

Projet européen *B21C* "Tone reservation performances for PAPR mitigation in DVB-T systems" D2.209.2 IETR, Décembre 2007.

Projet européen *B21C* "Tone reservation performances for PAPR mitigation in DVB-T systems : practical considerations" D2.209.3 IETR, Novembre 2008.

Réseau d'excellence *NEWCOM* "Report on research gaps and action plan" DR4.1, Octobre 2004.

#### **2.12.2 Rapports dans le cadre de projets collaboratifs français**

Projet RNRT *COMMINDOR* "Premier rapport annuel" Décembre 2000

Projet RNRT *COMMINDOR* "Recalage de X-SIRADIF" Rapport semestriel, Juin 2001

Projet *AMONT* du Pôle Images et Réseaux, "Un panorama des techniques classiques de réduction du PAPR. Etude bibliographique", Livrable 1, Avril 2008.

Projet ANR *INFOP* "Rapport sur les fonctions communes aux différents standards", Livrable 4.1, Décembre 2008.

Projet ANR *INFOP* "Rapport sur le graphe fonctionnel", Livrable 4.2, Juillet 2009.

### **2.12.3 Rapports dans le cadre de projets bilatéraux**

Contrat Recherche Extérieur avec France Telecom Recherche et Développement (CRE 46124952), "Traitement numérique des non linéarités : un état de l'art de la littérature", Livrable 1, Février 2005.

Contrat Recherche Extérieur avec France Telecom Recherche et Développement (CRE 46124952), "Traitement numérique des non linéarités : rapport intermédiaire sur les avancées théoriques ", Livrable 2, Septembre 2005.

Contrat Recherche Extérieur avec France Telecom Recherche et Développement (CRE 46124952), "Traitement numérique des non linéarités : rapport sur les méthodes étudiées", Livrable 3, Octobre 2006.

Contrat Recherche Extérieur avec France Telecom Recherche et Développement (CRE 46124952), "Traitement numérique des non linéarités : spécifications des algorithmes choisis ", Livrable 4, Octobre 2006.

Contrat Recherche Extérieur avec France Telecom Recherche et Développement (CRE 46124952), "Amplification non linéaire d'un multiplex de porteuses modulées à fort PAPR : Rapport final ", Livrable 5, Octobre 2006.



## Chapitre 3

# Travaux de recherche

### 3.1 Introduction

Les études concernant le PAPR se répartissent en deux catégories bien distinctes : celles ayant pour but de décrire mathématiquement les variations du PAPR (en fonction du type de modulation, du sur-échantillonnage, du filtrage, ...) et celles visant à développer des méthodes afin de faire baisser le PAPR (en fonction du contexte, des contraintes des systèmes, ...). Mes différents encadrements de recherche à ce sujet ont donc toujours veillé à apporter des contributions sur ces deux aspects. Ceci constitua la trame directrice du résumé des mes travaux sur le PAPR.

En ce qui concerne mes travaux sur la paramétrisation, ils feront l'objet de la dernière partie de ce chapitre.

### 3.2 Résumé des travaux sur le PAPR

#### 3.2.1 Description analytique du PAPR

##### 3.2.1.1 Contribution sur le Power Ratio (PR)

Le PAPR d'un signal  $s(t)$  est une grandeur exprimant le rapport entre le maximum de la puissance instantanée de  $s(t)$  et sa puissance moyenne. Plusieurs difficultés apparaissent alors instantanément : sur quel interval de temps sont calculés le maximum et la moyenne de la puissance instantanée, le signal est-il continu, échantillonné, le signal est-il en bande de base ou en radio fréquence ? De plus la littérature, très abondante sur le sujet, propose différentes appellations pour décrire ce rapport de puissance, très proches du PAPR, ce qui prête grandement à confusion. On trouve ainsi le PMPER <sup>(1)</sup>, le CF <sup>(2)</sup>, le PEP <sup>(3)</sup>.

L'ensemble de ces questions a ainsi donné naissance à une contribution de la thèse de Sidkiéta Zabré (2003-2007) visant à unifier les appellations en les regroupant sous le terme PR pour Power Ratio et en le déclinant selon les états du signal et de l'intervalle de calcul.

---

(1). Peak to MEan Envelope Power

(2). Crest Factor

(3). Peak Envelope Power

Le Power Ratio se définit de façon générale comme étant le rapport du maximum de la puissance instantanée d'un signal quelconque et de sa puissance moyenne. C'est une définition générale. Ainsi,

$$PR = \frac{\text{Max}|s|^2}{E\{|s|^2\}}. \quad (3.1)$$

Le signal peut être continu ou discret. De plus, le maximum et la moyenne de la puissance instantanée peuvent être calculés sur des temps infinis (pour avoir des bornes théoriques) ou des temps finis (cas pratiques).

La publication <sup>(4)</sup> de référence pour cette contribution est [20] :

*Jacques Palicot, Yves Louët "Power Ratio definition and analysis in single carrier modulation", EUSIPCO 05, Antalya, Turkey, September 05.*

### 3.2.1.2 Contribution sur le lien entre le PMEPR et le PAPR

Ces deux grandeurs, PMEPR et PAPR, étant calculées respectivement sur des signaux en bande de base et radio fréquence, il y a un lien mathématique entre elles. Il a alors été montré que :

$$PAPR_{dB} = PMEPR_{dB} + 3dB. \quad (3.2)$$

Cette relation montre alors qu'il y a 3 dB de différence entre un PR calculé en bande de base et un PR calculé en radio fréquence. Ce résultat est fondamental.

La publication de référence pour cette contribution est [21] :

*Jacques Palicot, Yves Louët "Synthèse de la notion de facteur de crête et application aux modulations monoporteuses", GRETSI 05, Louvain la Neuve, Belgique, 6-8 Septembre 2005.*

### 3.2.1.3 Contribution sur la majoration du PR en modulation monoporteuse avec filtrage de Nyquist

Bien que le PR ait été principalement décrit pour des modulations multiporteuse (de type OFDM), il manquait une contribution sur les systèmes monoporteuse. Lorsqu'un filtre de mise en forme de Nyquist est utilisé, la majoration du PR proposée dépend du roll off du filtre de mise en forme. Le résultat majeur de cette contribution réside dans le fait que le PR est infini pour un roll off nul. Ce *PR* décroît ensuite lorsque le roll off augmente.

La publication de référence pour cette contribution est [20] :

*Jacques Palicot, Yves Louët "Power Ratio definitions and analysis in single carrier modulation", EUSIPCO 05, Antalya, Turkey, September 05.*

---

(4). cet article est reproduit dans le Chapitre 4

#### 3.2.1.4 Contribution sur la majoration du PR en modulation monoporteuse avec filtrage en racine de Nyquist

Les systèmes pratiques utilisant un filtrage de mise en forme de type racine de Nyquist, une majoration du PR a été proposée dans la thèse de Basel Rihawi (2005-2008). Comme dans le cas précédent, cette majoration dépend du roll off du filtre de mise en forme. Dans ce cas, le PR passe par une valeur minimale de l'ordre de 3 à 3.5dB pour un roll off compris entre 0.4 et 0.5. Le PR reste ensuite stable lorsque le roll off augmente.

La publication de référence pour cette contribution est [22] :

*Steredenn Daumont, Basel Rihawi, Yves Louet "Root Raised Cosine filter influences on PAPR distribution of single carrier signals" IEEE ISCCSP 08, Malta, March 08.*

#### 3.2.1.5 Contribution sur la mise en évidence de l'influence du canal de propagation dans la statistique du PR des signaux de réception

Même si la plupart des travaux sur le PR sont concentrés sur l'émission, il est cependant nécessaire de connaître la dynamique des signaux côté réception afin de dimensionner les étages analogiques et en particulier l'amplificateur faible bruit (Low Noise Amplifier). Une contribution importante de la thèse de Basel Rihawi (2005-2008) a justement été de proposer pour différents contextes (SISO et MIMO) des relations théoriques du PR en réception dans le cas de signaux OFDM. Le résultat majeur est que le PR mesuré en réception diminue lorsque le nombre d'antennes d'émission augmente. Ce phénomène est accentué lorsque le nombre de trajets du canal de propagation augmente aussi.

La publication de référence pour cette contribution est [23] :

*Rihawi B, Louët Y, Gaussian and Flat Rayleigh Fading Channel Influences on PAPR Distribution in MIMO-OFDM Systems, European Wireless Conference, Paris, France, April 2007.*

#### 3.2.1.6 Contribution sur la moyenne et variance PR pour des signaux OFDM continus

Bien que beaucoup de développements théoriques aient été proposés dans la littérature concernant la distribution du PAPR d'un signal OFDM, peu abordaient le cas d'un signal OFDM continu. Seules des approximations ont été publiées, sans justification théorique. La difficulté réside en effet dans l'extrapolation au cas continu des relations classiques obtenues dans le cas discret. Dans le cadre de la thèse de Sajjad Hussain (2006-2009), les deux premiers moments (moyenne  $m$  et variance  $\sigma^2$ ) ont été proposés pour un signal OFDM continu. Les relations sont les suivantes :

$$m = \mu(\ln N + \beta), \quad \beta = \ln \frac{\alpha}{\sqrt{e}}, \quad (3.3)$$

où  $\mu$  et  $\alpha$  sont les constantes résultant d'un algorithme d'optimisation. Dans les travaux menés,  $\mu \approx 1.07$  et  $\alpha \approx 5.12$ .



Concernant la variance, il a été montré que la relation proposée pour des signaux discrets était en conformité avec celle des signaux continus. Ainsi,

$$\sigma^2 \approx \frac{\pi^2}{6}. \quad (3.4)$$

La publication de référence pour cette contribution est [24] :

*Yves Louët, Sajjad Hussain "Peak to Mean Power Ratio Statistical Analysis of continuous OFDM signals" IEEE VTC 08, Singapor, May 08.*

### 3.2.1.7 Contribution sur la statistique du PR pour des signaux radio logicielle

La tendance des télécommunications évolue naturellement vers la conception de réseaux radio logicielle capables de supporter plusieurs normes. Un tel scénario impose que le signal émis (par la station de base) soit composé de plusieurs standards. La question est donc de savoir si, dans ce contexte, les signaux émis sont à fort PR et quelles en sont les dynamiques. La réponse a été apportée lors de la thèse de Sajjad Hussain (2006-2009). Il a été montré que la distribution des signaux radio logicielle approche une statistique gaussienne comme dans le cas de signaux OFDM. Un tel résultat n'est pas étonnant : comme en OFDM, un signal radio logicielle étant modélisé comme la somme mathématique de plusieurs formes d'ondes (standards), il est normal que la statistique trouvée soit celle d'une loi normale.

La publication de référence pour cette contribution est [25] :

*Yves Louët, Sajjad Hussain "Peak to Average Power Ratio Analysis of Multi-carrier and Multi-standard signals in software radio context" IEEE ICTTA 08, Damas, Syria, April 08.*

### 3.2.1.8 Contribution sur la formulation fréquentielle du PR

Une caractéristique de la radio logicielle réside dans le fait que les signaux sont plutôt décrits dans le domaine fréquentiel que temporel. C'est en fait la vision du spectre qui devient incontournable surtout pour la radio intelligente. De ce fait, l'idée est apparue de traduire en fréquentiel la notion de PR. Une autre raison à cela est la nécessité de donner une relation mathématique liant le PR d'un signal filtré avec le filtre et le PR du signal d'entrée. Il est plus aisé de travailler alors dans le domaine fréquentiel à condition cependant d'avoir une équivalence fréquentielle du PR. Cette étude n'est pas encore tout à fait aboutie. Cependant des avancées importantes ont été faites durant les thèses de Sidkiéta Zabré (2003-2007) pour l'OFDM et Sajjad Hussain pour la radio logicielle (2006-2009). L'idée est de partir d'une vision symbole par symbole du signal temporel, traduit en fréquentiel, remplissant ainsi un tableau "temps-fréquence". On montre alors l'équivalence entre les PR calculés à l'aide des échantillons temporels et fréquentiels. Ceci a fait l'objet des travaux de Sidkiéta Zabré.

Pour ce qui concerne la radio logicielle, une relation approchée a été proposée liant le PR calculé avec les échantillons fréquentiels et le PR calculé avec les échantillons temporels. Une borne a été proposée, majorant l'expression cherchée. Ces travaux ont été menés dans

le cadre de la thèse de Sajjad Hussain.

La publication <sup>(5)</sup> de référence pour cette contribution est [26] :

*Jacques Palicot, Yves Louet, Sajjad Hussain, Sidkieta Zabre "Frequency Domain Interpretation of Power Ratio Metric for Cognitive Radio Systems", IET Communications Journal, vol.2, Issue 6, pp. 783-793, July 2008.*

### 3.2.2 Développement de méthodes de réduction du PR et de réduction des linéarités causées par l'amplificateur de puissance

La littérature concernant les méthodes de réduction du PR datent des années 1996-97. En effet le milieu des années 90 aura vu le succès de standards à base de modulation OFDM : le Digital Audio Broadcasting (DAB) et la version terrestre du Digital Video Broadcasting (DVB-T). Il était bien connu des chercheurs et ingénieurs de l'époque que l'OFDM avait pour inconvénient le fort PR à l'émission pour les étages d'amplification. Le problème avait alors été contourné en sur-dimensionnant les amplificateurs de puissance. Cette solution n'étant pas optimale, elle a depuis donné lieu à une foison de propositions très diverses et encore aujourd'hui, de nouvelles méthodes sont proposées.

Dans ce contexte, depuis ma thèse (1997-2000), mes encadrements doctoraux et post-doctoraux ont donné lieu à des développements de nouvelles méthodes dans des contextes variés : OFDM, MIMO-OFDM et radio logicielle.

#### 3.2.2.1 Contribution sur la classification des méthodes de la littérature

Comme énoncé dans l'introduction, il existe un nombre très important de méthodes se proposant de réduire le PR. En se basant uniquement sur le critère du PR, il est assez simple de les comparer entre elles. Cependant, il paraît évident que seules les performances examinées sous l'angle du PR ne peuvent suffire. Il faut en effet prendre en compte d'autres facteurs tout aussi importants : la complexité, la dégradation ou non du taux d'erreur binaire, la modification ou non du récepteur, la dégradation ou non de l'efficacité spectrale, ... . De plus, il convient bien de distinguer les méthodes visant à réduire le PR et les méthodes visant à linéariser l'amplificateur de puissance. En effet, dans le premier cas, l'objectif est d'augmenter le rendement de l'amplificateur de puissance en se rapprochant de la saturation. Dans le deuxième cas, l'idée est de rendre l'amplificateur linéaire.

Dans ce contexte, j'ai proposé avec Jacques Palicot une classification de méthodes en les distinguant selon les critères clés évoqués ci-dessus. La Fig.3.1 résume cette classification.

La publication <sup>(6)</sup> de référence pour cette contribution est [27] :

*Yves Louet and Jacques Palicot "A classification of methods for efficient power amplification of signals" Annals of Telecommunications, vol. 63, Issue 7-8, pp 351-368, July/August 2008.*

---

(5). cet article est reproduit dans le Chapitre 4

(6). cet article est reproduit dans le Chapitre 4

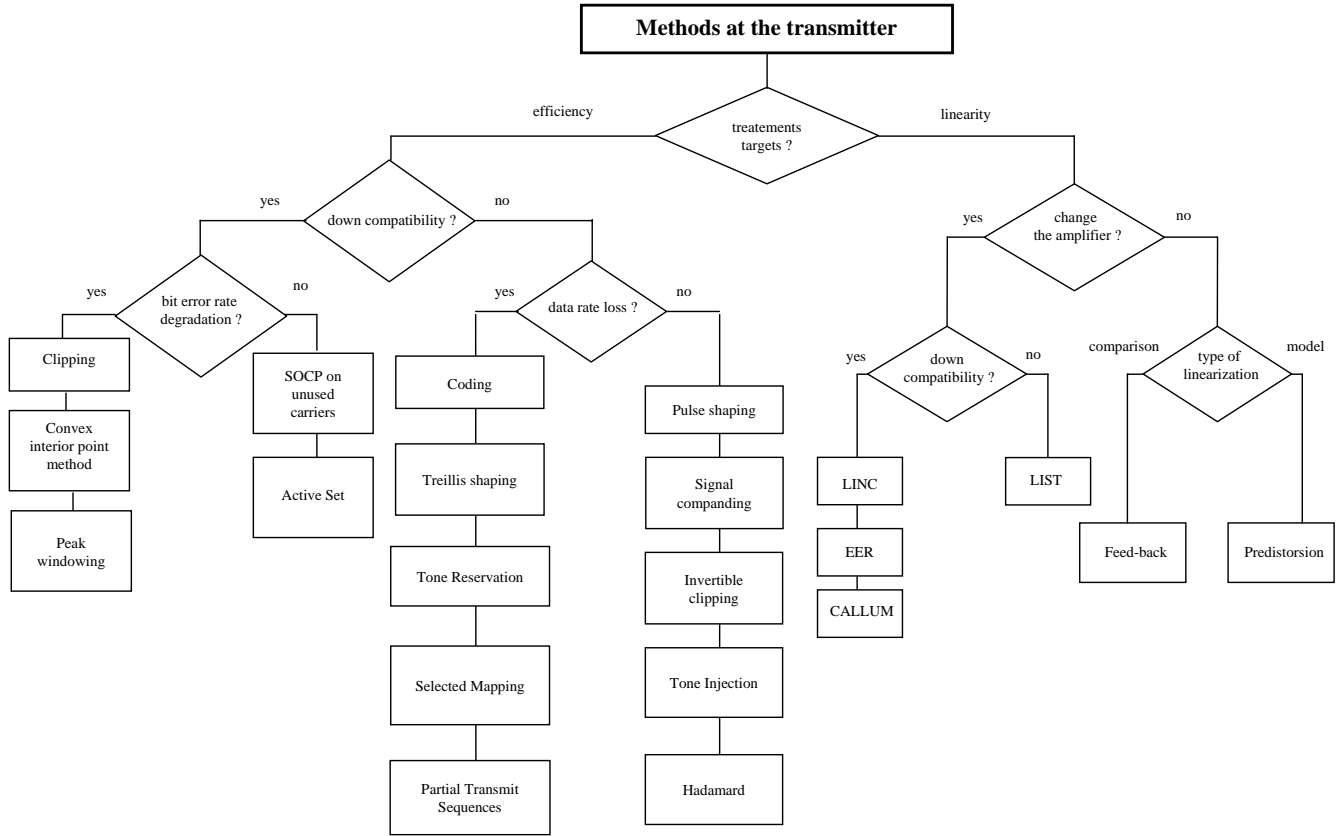


FIGURE 3.1 – Classification des méthodes de réduction du PR et de linéarisation

### 3.2.2.2 Contribution sur la réduction des non linéarités créées l'amplificateur de puissance à l'aide de réseaux de neurones

Mon premier encadrement de thèse sur la thématique des non linéarités causées par l'amplificateur de puissance a eu lieu avec Sylvain Tertois (2003-2006). Un des axes de recherche de l'équipe Electronique Traitement du Signal et Neuromimétisme (ETSN, ex. SCEE) était le développement d'algorithmes de réseaux de neurones. Réduire le PR à l'aide d'une telle approche était originale à l'époque et c'est pour cela que des travaux ont été initiés avec Sylvain Tertois.

Utiliser un réseau de neurones pour réduire le PR implique que la méthode se situe dans la partie réception. Cette approche bien qu'originale présente cependant l'inconvénient d'être située à la réception et que la phase d'apprentissage reste relativement complexe. La Fig.3.2 illustre la position du traitement des non linéarités.

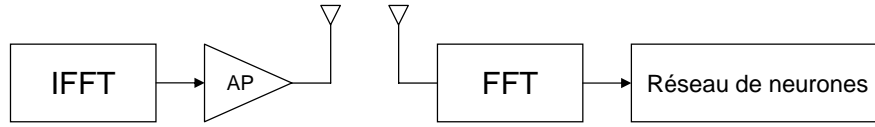


FIGURE 3.2 – Schéma simplifié de la méthode réduction des non linéarités par réseaux de neurones

La publication de référence pour cette contribution est [30] :

*S. Tertois, Y. Louët, G. Vaucher, A. Le Glaunec Réduction des effets des non-linéarités du signal OFDM à l'aide d'un réseau de neurones d'ordre supérieur, Conférence internationale des Sciences Electroniques, Technologies de l'Information et Télécommunications 2003 (SETIT 2003), Tunis.*

### 3.2.2.3 Contribution sur la réduction des non linéarités de l'amplificateur à l'aide d'une fonction de clipping inversible

Cette contribution a fait l'objet d'une collaboration entre SUPELEC et FTRetD en 2005 dans le cadre de la thèse de Salvatore Ragusa (2002-2005). Bien que n'ayant pas encadré cette thèse, j'ai apporté ma contribution sur une technique originale visant à réduire le PR des systèmes OFDM. Cette approche est inspirée du domaine de l'automatique : avant l'amplificateur de puissance, le signal est distordu par une fonction de clipping plus sévère que celle de l'amplificateur mais inversible en réception. L'idée de base est de modifier la statistique des signaux avant leur amplification. Le principe de cette méthode est illustré sur la Fig.3.3.

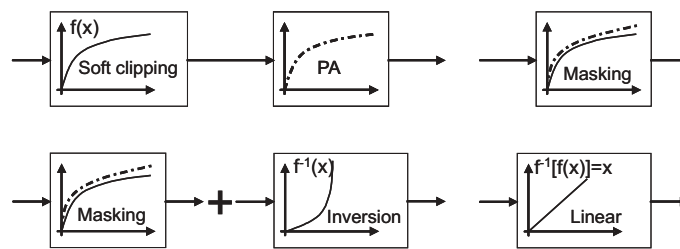


FIGURE 3.3 – Principe de l'écrétage inversible

La publication de référence pour cette contribution est [36] :

*S. Ragusa, J. Palicot, Y. Louët and C. Lereau, Invertible Clipping for Increasing the Power Efficiency of OFDM Amplification, IEEE International Conference on Telecommunications, May 08-12, 2006, Madeira island, Portugal.*

### 3.2.2.4 Contribution sur la réduction du PR à l'aide de codage de canal

Ma thèse a débuté en 1997, date à laquelle les premiers travaux sur le PR ont été publiés : le SeLected Mapping, le Partial Transmit Sequence, le clipping/filtrage. A cette date, Davis et Jedwab ont publié un article montrant que les codes de Reed-Muller pouvaient être utilisés pour maintenir le PR des signaux OFDM à exactement  $3dB$  et ceci quelque soit le nombre de porteuses. Les contributions principales de mes travaux de thèse résident alors dans :

- concaténation de séquences complémentaires pour augmenter le nombre de porteuses de la méthode au détriment du PR
- décodage à décisions souples pour réduire le taux d'erreur
- réalisation d'un codage/décodage produit BCH-Reed-Muller pour augmenter les performances de la chaîne de transmission

La Fig.3.4 donne un schéma simplifié de la chaîne de transmission développée.

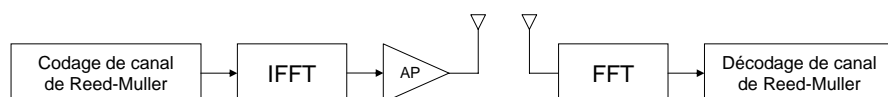


FIGURE 3.4 – Schéma simplifié de la méthode de codage de Reed-Muller par codage de canal

La publication <sup>(7)</sup> de référence pour cette contribution est [28] :

*Y.Louët and A. Le Glaunec, " Peak-factor reduction in OFDM by Reed-Müller channel coding : a new soft decision decoding algorithm " Proceedings of IEEE MELECON 2000, Vol. 2, pp. 872-875, Cyprus, May 2000.*

### 3.2.2.5 Contribution sur la réduction du PR par méthode géométrique

Cette contribution se situe dans le cadre de la thèse de Désiré Guel (2006-2009). L'originalité de cette approche réside dans le développement théorique visant à obtenir de façon géométrique un signal  $x(t)$  dont la somme avec un signal utile  $s(t)$  à fort PR donnera un signal à PR réduit. Ce problème très général est connu sous le terme "ajout de signal", c'est à dire que l'on cherche à créer un signal artificiel qui, ajouté au signal utile, puisse réduire le PR. On montre alors que l'ensemble des solutions décrit un cercle ( $\zeta_1$  sur la Fig.3.5) et que la solution optimale permettant de minimiser la puissance ajoutée est représentée par un point ( $Y^*$  sur la Fig.3.5).

Le brevet de référence pour cette contribution est [31] :

(7). cet article est reproduit dans le Chapitre 4



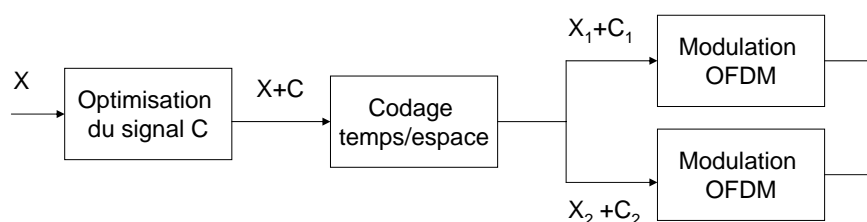


FIGURE 3.6 – Principe de la méthode d'ajout de signal appliquée aux systèmes MIMO-OFDM

### 3.2.2.7 Contribution sur la réduction du PR à l'aide de porteuses hors bande créées par suréchantillonnage

Dans le cadre de la thèse de Sidkiéta Zabré (2003-2007), nous avons focalisé nos travaux sur une technique très prometteuse proposée par Tellado [19]. Il s'agit d'agir dans le domaine fréquentiel du signal utile dont on cherche à réduire le PR. En effet, Tellado a montré qu'en réservant des porteuses (sans en préciser le type), il était possible, moyennant un algorithme d'optimisation, de réduire le PR de façon très significative.

Dans le cadre des travaux de Sidkiéta Zabré, les porteuses dédiées à la réduction du PR étaient situées hors de la bande du signal utile du signal OFDM, c'est à dire les bandes de garde. Bien évidemment, il est nécessaire que ces porteuses soient situées sous le masque du standard en question. Les résultats apportés étaient très prometteurs mais limités cependant au nombre de porteuses disponibles dans ces bandes de garde. L'idée a alors été de créer des porteuses supplémentaires par suréchantillonnage (porteuses dites "fantômes") afin de réduire d'autant plus le PR. Ces approches n'ont cependant un sens qu'à condition de maîtriser la puissance totale du signal émis. Une contrainte sur cette puissance, en plus de celle visant à respecter les gabaris des standards, doit donc être posée.

La publication<sup>(10)</sup> de référence pour cette contribution est [45] :

*Zabre S, Palicot J, Louët Y, Lereau C, Reduction of OFDM Peak to Mean Envelope Power Ratio using Ghost Carriers, The Third International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2007, Guadeloupe, March 07.*

### 3.2.2.8 Contribution sur la réduction du PR à l'aide de porteuses réservées dans la bande utile du spectre

Dans le cadre du projet CELTIC Broadcast for the 21th Century (B21C), j'ai été amené à encadrer Irène Mahafeno qui effectuait son post-doc. L'objectif de ce projet est d'être une force de proposition pour le forum DVB pour la définition des futurs standards de télévision numérique (terrestre et mobile). La principale contribution de nos travaux réside dans l'idée de réserver des porteuses dans la bande utile pour réduire le PR, à la

(10). cet article est reproduit dans le Chapitre 4

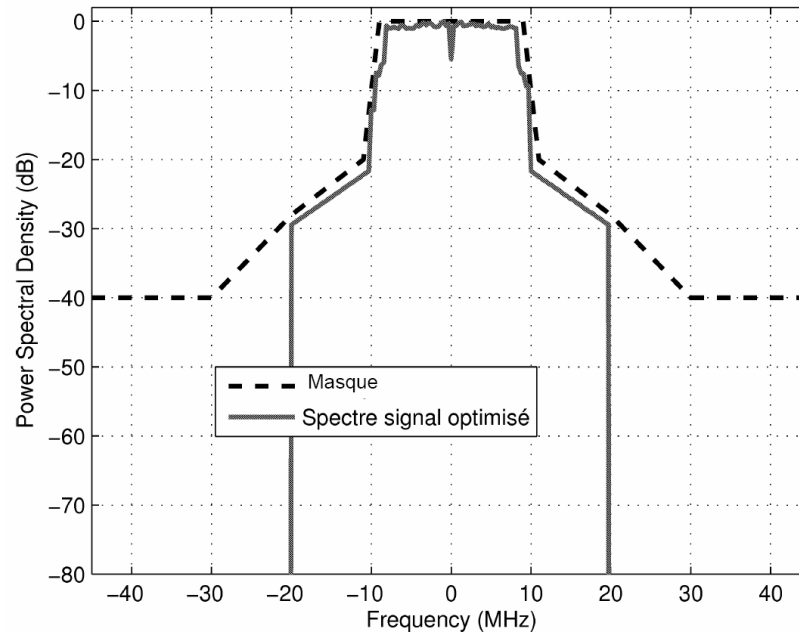


FIGURE 3.7 – Insertion de porteuses fantômes en dehors de la bande utile d'un standard

manière dont les porteuses pilotes sont utilisées pour estimer le canal de propagation d'un symbole OFDM à l'autre (voir Fig.3.8). Ces porteuses réservées pour le PR ne doivent pas être en nombre trop important afin de ne pas trop réduire l'efficacité spectrale et doivent être limitées en puissance car elles sont amplifiées de la même manière que les porteuses de données. Ces études ont été menées dans le projet B21C mais en parallèle de celles effectuées par d'autres industriels du marché visant aussi à promouvoir la solution des porteuses dites "réservées". Les propositions vers le consortium DVB de l'ensemble des contributions allant dans ce sens ont abouti en Juin 2008 à la première ébauche de la norme DVB-T2 (future génération de télévision numérique terrestre) retenant ainsi le principe des porteuses "PR" réservées dans la bande utile.

La publication<sup>(11)</sup> de référence pour cette contribution est [35] :

*Irène Mahafeno, Yves Louët, Jean-François Hélaré " Peak-to-average power ratio reduction using second order cone programming based tone reservation for terrestrial digital video broadcasting systems", IET Communications Journal, vol. 3, Issue 7, pp. 1250-1261, July 2009*

(11). cet article est reproduit dans le Chapitre 4



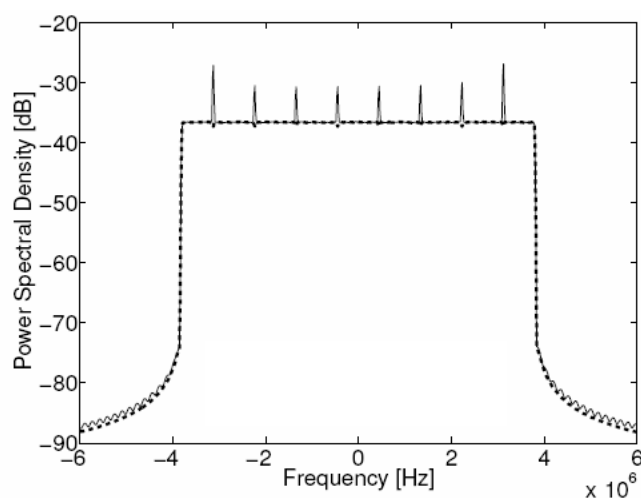


FIGURE 3.8 – Illustration des porteuses réservées dans la bande utile (ici 8 à titre d'exemple)

### 3.2.2.9 Contribution sur la réduction du PR à l'aide des bandes libres d'un spectre radio logicielle

Les travaux précédents (ceux de Sidkiéta Zabré et Irène Mahafeno) ont été menés dans un contexte OFDM. En les extrapolant à la Radio Intelligente, Sajjad Hussain (thèse 2006-2009) a montré que dans un contexte d'accès au spectre de façon opportuniste, un contrôle de PR est nécessaire. En effet, un multiplex de signaux possédant déjà un fort PR, il paraît évident que son accès opportuniste par un terminal intelligent tendra à dégrader le PR, qu'il faut donc limiter. Le PR devient alors une métrique à prendre en compte au sens de la radio intelligente pour aider le terminal à prendre les bonnes décisions liées à la communication opportuniste. Ainsi, les trous dans le spectre peuvent donc non seulement servir à transmettre une communication opportuniste mais aussi à transmettre des informations de corrections à la manière de ce qui est proposé dans un contexte OFDM.

La publication de référence<sup>(12)</sup> pour cette contribution est [26] :

*Jacques Palicot, Yves Louet, Sajjad Hussain, Sidkiéta Zabre "Frequency Domain Interpretation of Power Ratio Metric for Cognitive Radio Systems", IET Communications Journal, vol.2, Issue 6, pp. 783-793, July 2008.*

### 3.2.2.10 Contribution sur la réduction de PR à l'aide d'une fonction de clipping hyperbolique

La solution la plus intuitive et la plus simple pour limiter les fortes amplitudes d'un signal est de les saturer au delà d'un seuil donné. C'est la technique de clipping classique. Les inconvénients liés à cette solution résident dans la dégradation du taux d'erreur binaire

(12). cet article est reproduit dans le Chapitre 4

et dans la remontée des lobes secondaires. En proposant une nouvelle forme de clipping de type hyperbolique et insérant la distortion dans les porteuses réservées d'un symbole OFDM, le PR initial est réduit, et ceci d'autant plus que le nombre d'itération du processus est important. Le taux d'erreur binaire n'est alors pas modifié et l'on peut contrôler l'augmentation de puissance moyenne.

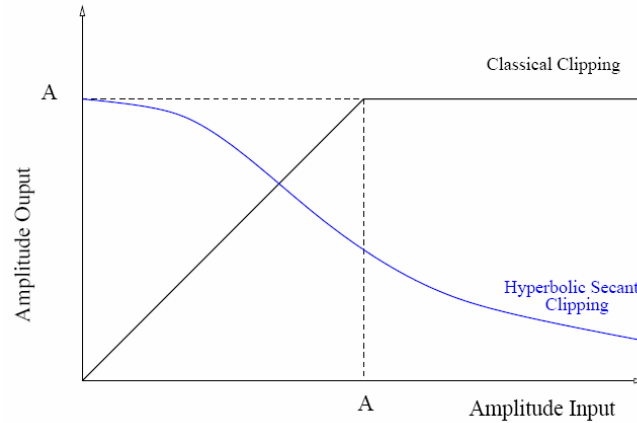


FIGURE 3.9 – Fonction de clipping de type sécante hyperbolique et clipping classique

Le brevet de référence pour cette contribution est [37] :

*Desiré Guel, Jacques Palicot, Yves Louet, "Clipping HSC tenant compte des porteuses non utilisées" 0950895 (numéro d'enregistrement national)*

### 3.2.2.11 Contribution sur la réduction du PR à l'aide de la fonction de deep-clipping

Dans le cadre du projet AMONT du Pôle Images et Réseaux, j'ai encadré Alexandre Skrzypczak dont l'objectif des travaux est de réduire le PR dans deux contextes différents : le Digital Radio Mobile (DRM) et le Digital Video Broadcasting-Handheld (DVB-H). Le projet est encore en cours et la première phase s'achève. Elle s'est focalisée sur le standard DVB-H où une solution originale de la littérature a été proposée à base d'une fonction de deep-clipping : le premier étage de clipping classique (HC) a été remplacé par un Deep Clipping (DC). La définition des filtres passe bas (FPB) et les opérations de suréchantillonnage ont alors été redéfinies pour le projet. Deux solutions ont été finalement proposées dites à " $f_s$ " et à " $2f_s$ ". Ces modifications ont permis d'améliorer les performances de la solution initiale de la société Teamcast pour le standard DVB-H. Le produit résultant est aujourd'hui commercialisé.

La publication associée à cette contribution a été soumise [38] :

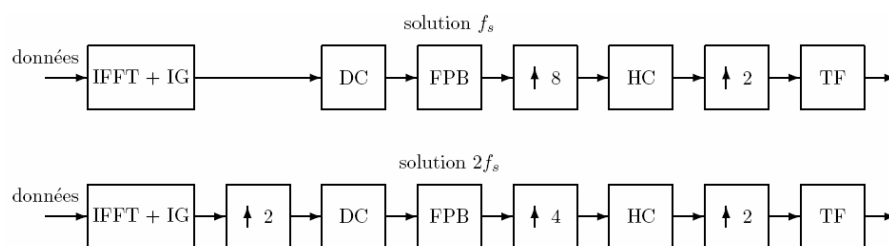


FIGURE 3.10 – Chaînes d'émission DVB-H à l'aide du Deep Clipping (DC)

---

*Alexandre Skrzypczak, Yves Louët, Cédric Lehobey, Stéphane Molton and Olivier Rousset, Improving a DVB-H modulator performance bu using deep-clipping", soumis à la conférence ISWCS 09.*

### 3.3 Résumé des travaux sur la paramétrisation

#### 3.3.1 Contexte des travaux

La paramétrisation est un domaine nouveau de la radio logicielle. Il consiste à rechercher les traitements communs entre plusieurs chaînes de télécommunications dans le but de réaliser un terminal multistandard le plus optimal possible. L'idée est alors de ne pas dupliquer les chaînes des standards considérés mais de réfléchir à des traitements communs qui peuvent donc être mutualisés. Dans ce contexte, on distingue l'approche par fonctions communes ou l'approche par opérateurs communs. La première aurait plutôt une déclinaison orientée "software" et la deuxième serait plus "hardware", encore que la frontière entre les deux ne soit pas clairement définie. Par exemple, le codage de canal pourrait être considéré comme une fonction commune entre plusieurs standards et l'opérateur MAC comme opérateur commun. L'objectif de nos travaux sur la paramétrisation est alors de proposer des opérateurs communs de grains plus "épais" que l'opérateur MAC, opérateur de plus bas niveau que l'on puisse trouver.

La FFT a été identifiée comme opérateur commun. En effet, bon nombres de traitements peuvent être efficacement réalisés dans le domaine fréquentiel (égalisation, canalisation, récepteur RAKE, ...). Pour pouvoir vraiment le considérer comme commun, il faut étendre l'intérêt d'un traitement fréquentiel à plus de fonctions. C'était l'objectif des travaux de la thèse d'Ali Al Ghouwayel. (2003-2007).

#### 3.3.2 Contribution sur la paramétrisation par opérateurs communs

L'idée de la paramétrisation est d'identifier des traitements communs qui peuvent être selon les contextes des fonctions (niveau software) ou des opérateurs (niveau hardware). Les études sur la paramétrisation peuvent se décliner en deux approches : une approche théorique et une approche pragmatique. L'approche théorique se donne pour objectif de rechercher le ou les opérateurs communs via l'optimisation d'une fonction décrivant les appels entre traitements d'un terminal. L'ensemble de ces appels sont décrits par un graphe [48]. L'autre approche, dite pragmatique, se donne une fonction et essaie de la mutualiser

le plus possible.

La publication de référence pour cette contribution est [39] :

*L.Alaus, J. Palicot, C. Roland, Y. Louët, D.Noguet "Promising technique of parametrisation for reconfigurable radio, the Common Operators Technique : fundamentals and examples", The Journal of Signal Processing Systems, publication en 2009.*

### 3.3.3 Contribution sur l'opérateur commun FFT

Les travaux d'Ali Al Ghouwayel ont consisté à développer et à intégrer sur FPGA un opérateur de FFT reconfigurable capable d'effectuer à la fois des transformées dans le corps  $\mathbb{C}$  des complexes et dans le corps  $GF$  de Galois. C'est sur ce dernier ensemble que sont définis les codes de Reed-Solomon (RS) et l'opérateur proposé permet donc d'effectuer des opérations classiques de transformées de Fourier mais aussi certaines opérations de codage canal relatives aux codes RS. Pour cela il a fallu rendre reconfigurables tous les éléments constituant la FFT, c'est à dire le multiplieur, l'additionneur et le soustracteur du papillon, qui est devenu lui aussi reconfigurable. Au final l'opérateur développé et porté sur FPGA présente des performances meilleures par rapport à une structure où les deux types de transformées auraient été dupliquées. Le papillon reconfigurable est donné Fig. 3.11. A partir de ce papillon, une architecture globale de FFT a alors été proposée.

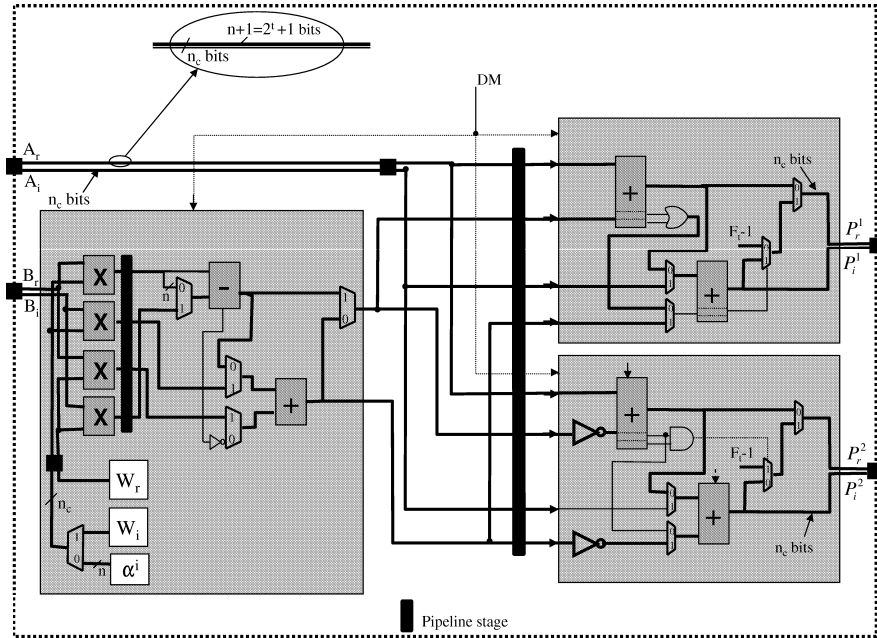


FIGURE 3.11 – Architecture du papillon reconfigurable opérant dans  $\mathbb{C}$  et  $GF(F_t)$

Les publications de référence pour cette contribution sont :

Architecture des opérateurs arithmétiques reconfigurables [40] :

*Ali Al Ghouwayel, Yves Louët, Jacques Palicot "A reconfigurable Butterfly for the Fourier and Fermat transforms", WSR 06, Karlsruhe, Germany, March 06.*

Architecture du papillon reconfigurable [41] :

*Al Ghouwayel A, Louët Y, Palicot J, Complexity Evaluation of a Re-Configurable Butterfly with FPGA for Software Radio Systems, PIMRC 07, September 07, Athens, Greece.*

Architecture de la FFT reconfigurable [42], [43] :

*Ali Al Ghouwayel, Yves Louët, Jacques Palicot "A reconfigurable architecture for the FFT operator in a software radio context", ISCASS 06, Island of Kos, Greece, May 06.*

*Ali Al Ghouwayel and Yves Louet "FPGA implementation of a re-configurable FFT for multi-standard systemes in software radio context", IEEE Trans. On Consumer Electronics Journal, vol. 55, n°2, pp. 950-958, May 2009.<sup>(13)</sup>*

### 3.3.4 Contribution sur l'identification d'opérateurs communs par graphes

Les différents appels entre fonctions dans un terminal multistandard peuvent être représentés graphiquement sous forme d'un arbre. Au sommet de l'arbre se trouvent les différents standards et à la base les briques élémentaires de l'électronique numérique (portes logiques). Entre ces deux niveaux, l'on trouve des fonctions de niveaux différents suivant la granularité. Par exemple, un standard de type WiMAX fait appel à la modulation OFDM qui elle-même fait appel à une transformée de Fourier (FFT), elle-même réalisée à base d'opérateurs papillons ; ces opérateurs papillons sont enfin réalisés avec des opérateurs de type additionneurs, multiplieurs, .... Cette approche peut-être généralisée pour un plus grand nombre de standards et pour toutes les appels entre fonctions. Ceci est illustré sur la Fig.3.12.

L'objectif est alors d'identifier parmi toutes les fonctions impliquées dans un tel terminal quelles sont celles qui peuvent être considérées comme communes. La minimisation d'une fonction de coût impliquant à la fois le nombre d'appels d'une fonction et sa complexité permet alors d'identifier les opérateurs communs optimaux.

Cette étude se base la théorie des graphes, une branche des mathématiques bien souvent appliquée en télécommunications. Une nouvelle collaboration entre l'équipe SCEE et l'Université Libanaise de Beyrouth permettra d'aller plus loin dans cette étude. Une thèse en co-tutelle est prévue d'ici la rentrée 2009.

La publication<sup>(14)</sup> de référence de ce travail est :

*Sufi Tabassum Gul, Ali Al Ghouwayel, Christophe Moy, Yves Louet "A novel design of reconfigurable Fourier Operator over C and GF(Ft) for future multi-standards SDR*

(13). cet article est reproduit dans le Chapitre 4

(14). cet article est reproduit dans le Chapitre 4

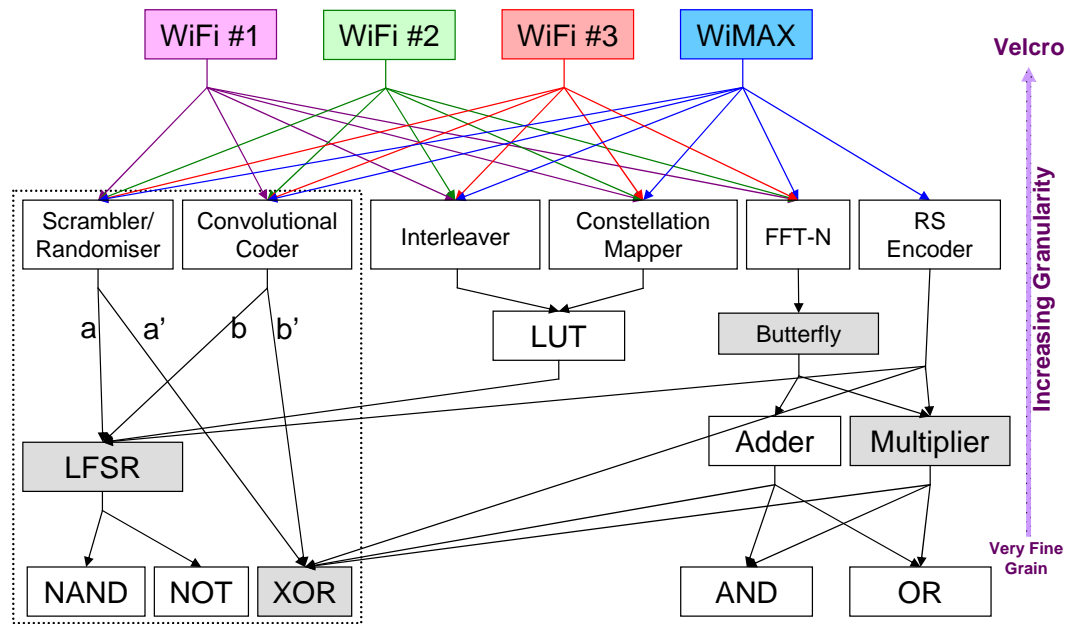


FIGURE 3.12 – Représentation des appels de fonctions dans un terminal multistandard

*equipments", International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Inderscience, publication en 2009*



## Chapitre 4

# Publications majeures

Ce chapitre regroupe un certain nombre de publications clés illustrant les travaux de recherche présentés au Chapitre 3. Les publications présentées sont les suivantes :

Jacques Palicot, Yves Louët "Power Ratio definition and analysis in single carrier modulation", EUSIPCO 05, Antalya, Turkey, September 05.

Steredenn Daumont, Basel Rihawi, Yves Louet "Root Raised Cosine filter influences on PAPR distribution of single carrier signals" IEEE ISCCSP 08, Malta, March 08.

Jacques Palicot, Yves Louet, Sajjad Hussain, Sidkieta Zabre "Frequency Domain Interpretation of Power Ratio Metric for Cognitive Radio Systems", IET Communications Journal, vol.2, Issue 6, pp. 783-793, July 2008.

Yves Louet and Jacques Palicot "A classification of methods for efficient power amplification of signals" Annals of Telecommunications, vol. 63, Issue 7-8, pp 351-368, July/August 2008.

Y.Louët and A. Le Glaunec, " Peak-factor reduction in OFDM by Reed-Müller channel coding : a new soft decision decoding algorithm " Proceedings of IEEE MELECON 2000, Vol. 2, pp. 872-875, Cyprus, May 2000.

Basel Rihawi and Yves Louet "PAPR Reduction Scheme with SOCP for MIMO-OFDM systems" International Journal of Communications, Network and System Sciences, vol.1, no 1, pp 29-35, Feb. 2008.

Zabre S, Palicot J, Louët Y, Lereau C, Reduction of OFDM Peak to Mean Envelope Power Ratio using Ghost Carriers, The Third International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2007, Guadeloupe, March 07.

Irène Mahafeno, Yves Louët, Jean-François Hêlard " Peak-to-average power ratio reduction using second order cone programming based tone reservation for terrestrial digital video broadcasting systems", IET Communications Journal, vol. 3, Issue 7, pp. 1250-1261,



July 2009

Ali Al Ghouwayel and Yves Louet "FPGA implementation of a re-configurable FFT for multi-standard systemes in software radio context", IEEE Trans. On Consumer Electronics Journal, vol. 55, n°2, pp. 950-958, May 2009.

Sufi Tabassum Gul, Ali Al Ghouwayel, Christophe Moy, Yves Louet "A novel design of reconfigurable Fourier Operator over  $\mathbb{C}$  and  $\mathbb{GF}(Ft)$  for future multi-standards SDR equipments", International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Inderscience, publication en 2009

## 4.1 Article sur la définition du Power Ratio et analyse en modulation mono porteuse avec filtrage de Nyquist

Jacques Palicot, Yves Louët "Power Ratio definition and analysis in single carrier modulation", EUSIPCO 05, Antalya, Turkey, September 05.

*Contributions* : généralisation de la définition du facteur de crête et obtention d'une borne du PR dans le cas des modulations monoporteuse (avec filtrage de Nyquist)

## 4.2 Article sur l'analyse du PAPR en modulation mono porteuse après filtrage en racine de Nyquist

Steredenn Daumont, Basel Rihawi, Yves Louet "Root Raised Cosine filter influences on PAPR distribution of single carrier signals" IEEE ISCCSP 08, Malta, March 08.

*Contribution* : obtention d'une borne du PAPR dans le cas des modulations monoporteuse (avec filtrage en racine de Nyquist)

### 4.3 Article sur la vision fréquentielle du PAPR et les conséquences dans l'accès au spectre

Jacques Palicot, Yves Louet, Sajjad Hussain, Sidkieta Zabre "Frequency Domain Interpretation of Power Ratio Metric for Cognitive Radio Systems", IET Communications Journal, vol.2, Issue 6, pp. 783-793, July 2008.

*Contributions* : cet article propose une vision fréquentielle du PAPR et montre une équivalence totale avec la vision temporelle. Il est ensuite montré que le PAPR doit être considéré comme un capteur au sens de la radio intelligente afin de maîtriser l'augmentation des fluctuations de puissance d'un signal radio logicielle dès lors qu'il y a un accès opportuniste au spectre

## 4.4 Article sur la classification de méthodes

Yves Louet and Jacques Palicot "A classification of methods for efficient power amplification of signals" Annals of Telecommunications, vol. 63, Issue 7-8, pp 351-368, July/August 2008.

*Contribution* : cet article propose une classification des méthodes de traitement des non linéarités en agissant sur le PAPR ou sur la fonction d'amplification

## 4.5 Article sur les codes de Reed-Muller et la réduction du PAPR

Y.Louët and A. Le Glaunec, " Peak-factor reduction in OFDM by Reed-Müller channel coding : a new soft decision decoding algorithm " Proceedings of IEEE MELECON 2000, Vol. 2, pp. 872-875, Cyprus, May 2000.

*Contribution* : développement d'un algorithme de décodage des codes de Reed-Muller pour la réduction du PAPR.

## 4.6 Article sur le PAPR des systèmes MIMO

Basel Rihawi and Yves Louet "PAPR Reduction Scheme with SOCP for MIMO-OFDM systems" International Journal of Communications, Network and System Sciences, vol.1, no 1, pp 29-35, Feb. 2008.

*Contribution* : proposition d'une méthode de réduction conjointe du PAPR sur chacune des branches d'un système MIMO à deux antennes d'émission

## 4.7 Articles sur la réduction du PAPR par réservation de porteuses

Zabre S, Palicot J, Louët Y, Lereau C, Reduction of OFDM Peak to Mean Envelope Power Ratio using Ghost Carriers, The Third International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2007, Guadeloupe, March 07.

Irène Mahafeno, Yves Louët, Jean-François Héliard " Peak-to-average power ratio reduction using second order cone programming based tone reservation for terrestrial digital video broadcasting systems", IET Communications Journal, vol. 3, Issue 7, pp. 1250-1261, July 2009

*Contributions* : moyennant la réservation de porteuses pour réduire le PAPR en dehors de la bande utile (premier article) et dans la bande utile (deuxième article) , ces articles montrent qu'il est possible de réduire fortement le PAPR tout en contrôlant l'augmentation de puissance moyenne.



## 4.8 Article sur la paramétrisation par opérateurs communs

Ali Al Ghouwayel and Yves Louet "FPGA implementation of a re-configurable FFT for multi-standard systemes in software radio context", IEEE Trans. On Consumer Electronics Journal, vol. 55, n°2, pp. 950-958, May 2009.

*Contribution* : cet article propose une FFT commune aux corps des complexes et aux corps de Galois

## 4.9 Articles sur la paramétrisation et l'approche par les graphes

Sufi Tabassum Gul, Ali Al Ghouwayel, Christophe Moy, Yves Louet "A novel design of reconfigurable Fourier Operator over  $\mathbb{C}$  and  $\text{GF}(\text{Ft})$  for future multi-standards SDR equipments", International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Inderscience, publication en 2009

*Contribution* : cet article valide l'intérêt d'utiliser l'opérateur FFT pour le codage de canal en utilisant une approche théorique basée sur la théorie des graphes et l'optimisation d'une fonction de coût.



## Chapitre 5

# Conclusion générale, perspectives et projet de recherche

Au terme d'une dizaine d'années passées à travailler sur le problème du PR, plusieurs conclusions doivent être tirées :

- la mesure du PR seul ne peut suffire à l'établissement de performances d'une méthode de réduction ; la complexité, la dégradation de l'efficacité spectrale, l'augmentation de puissance moyenne, la dégradation du taux d'erreur, ... sont des exemples de paramètres clés à estimer conjointement.
- la prise en compte du problème du PR dès l'établissement des normes est un point essentiel : l'exemple du DVB-T2 va dans ce sens car des porteuses spécifiques de correction sont maintenant prévues dans la bande utile, à la manière des porteuses pilotes qui servent à estimer le canal.
- les méthodes de linéarisation sont complémentaires aux méthodes de réduction de PR : les premières ont pour objectif de rendre l'amplification linéaire alors que les deuxièmes s'efforcent d'augmenter le rendement de l'amplificateur et donc la consommation des systèmes d'émission.
- l'évolution des systèmes de télécommunications montre que les formes d'onde ont des PR de plus en plus fort. La radio logicielle en est un très bon exemple. La prise en compte de cet aspect est donc primordiale pour diminuer la consommation des équipements, point aujourd'hui crucial.

Concernant la paramétrisation, les points essentiels à retenir sont :

- la recherche d'opérateurs communs est un point essentiel dans le développement de systèmes multistandard.
- l'identification d'un opérateur commun ne peut à elle seule suffire : il faut établir un partitionnement des tâches entre les différents systèmes qui devront faire appel à cet opérateur commun. Les gains réels en terme de performance/complexité seront

alors à établir.

Les perspectives de ces travaux sont nombreuses, constituant en partie mon projet de recherche.

Concernant les études sur le facteur de crête, plusieurs points doivent être soulignés :

Dans un premier temps, il manque une étude mathématique concernant l'influence de la fonction de filtrage sur le facteur de crête d'un signal. La difficulté réside dans l'établissement du maximum du signal filtré en fonction du maximum du signal non filtré et des caractéristiques du filtre. Cet aspect a été abordé dans les thèses de Sidkiéta Zabré et de Sajjad Hussain en proposant une vision fréquentielle du PR. Les résultats aboutissent à des majorations théoriques sans toutefois donner de résultats analytiques facilement exploitables. Cet outil essentiel pourra ensuite servir à établir les performances des méthodes de réduction du facteur de crête incluant un filtrage du signal de correction.

Dans un second temps, il me semble important de revisiter des méthodes simples de réduction de facteur de crête pour les améliorer. Les travaux effectués durant la thèse de Désiré Guel vont en effet dans ce sens à chercher à trouver d'autres fonctions de clipping, ce qui a abouti au clipping hyperbolique. Il en a été de même durant le post-doc d'Alexandre Skrzypczak où le clipping a été remplacé par le deep-clipping. Il est à mon avis tout à fait possible de faire le même raisonnement sur d'autres méthodes.

Ensuite, une étude sur l'approche conjointe réduction du facteur de crête et linéarisation me paraît tout à fait judicieuse. Jusqu'à ce jour, ces deux traitements sont développés de façon séparée et un échange d'informations doit pouvoir en optimiser la complexité et donc gagner en performance.

Enfin, il est utile de rappeler que l'objectif premier des méthodes de réduction de facteur de crête est la réduction de la consommation des équipements (satellites, baies d'émission, terminaux radio mobiles). Cette approche se situe complètement dans une tendance qui ira en s'accroissant à savoir la réduction de notre facture énergétique. Une réponse doit être apportée par le traitement du signal. C'est exactement sur ce dernier point que mes activités de réduction du facteur de crête et de la paramétrisation se rejoignent : trouver des solutions pour réduire la consommation de nos futurs systèmes de télécommunications.

Concernant les études sur la paramétrisation, plusieurs pistes de recherche se dégagent :

Dans un premier temps, il est nécessaire de considérer l'ordonnancement des données une fois l'identification des opérateurs commun faite. En effet, un opérateur commun ne peut être utilisé par plusieurs tâches à la fois et cet aspect n'a pas été encore abordé.

Enfin, il me semble nécessaire de prolonger le travail de Sufi Tabassum Gul en s'appuyant sur la théorie des graphes de façon à aborder le problème de façon plus global.



# Bibliographie

- [1] Lee de Forest "Oscillation Responsive Device", US Patent 0824637, 1906.
- [2] Black, H.S, "Translating system" US Patent 1 686 792, October 1928
- [3] Seidel H., H.R. Beurrier and A.N. Friedman "Error Controlled High Power Linear Amplifiers at VHF", The Bell System Technical Journal, Vol. 47, May/June 1968, pp. 651-722.
- [4] Olver T.E., D.C. Andrews, B.S. Abrams and E.E. Barr "Linear wideband HF power amplifier using adaptive feedforward cancellation" Proc. of the IEEE Military Communications Conference, MILCOM, Vol.1, pp.21.6/1-8, 1982.
- [5] Motorola Semiconductors Ltd, RF Device Data, Vol.II, Fifth Edition, pp. 134-135, 1988.
- [6] Dixon J.P. "A solid-state amplifier with feedforward correction for linear single side band applications" Proc. of the IEEE International Conference on Communications, pp. 728-732, Toronto, Canada, June 1986.
- [7] Stewart R.D. and F.F. Tusubira "Feedforward linearisation of 950 MHz amplifiers", IEE Proc., Vol. 135, Pt H, n°5, pp. 347-350, October 1988.
- [8] Black H.S., US Patent 2 102 671, December 1937.
- [9] Seidel H., H.R. Beurrier and A.N. Friedman "Error Controlled High Power Linear amplifiers at VHF" Bell Syst. Tech. May-June 1968.
- [10] Arthanayake T. and H.B. Wood "Linear amplification using envelope feedback" Electron. Lett., Vol. 7, N°7, pp. 145-146, 1971.
- [11] Petrovic V. and W. Gosling "Polar loop transmitter", Electron. Lett., Vol. 15, N°10, pp. 286-287, 1979.
- [12] Petrovic V. and C.N. Smith "Reduction of Intermodulation Distortion by Means of Modulation Feedback "IEE Conf. on Radio Spectrum Conservation Techniques, pp. 44-49, Sept. 1983.
- [13] ETS 300 392 :2 "Radio Equipment and Systems (RES), Trans European Trunked Radio (TETRA), Voice plus Data (V+D)", Part 2 : Air Interface (AI), European Telecommunication Standards Institute (ETSI), 1996.
- [14] Van Nee R.J., De Wild A., Reducing the Peak to Average Power ratio of COFDM, Proc.VTC 98, Ottawa, Canada, pp 2072-2076, 1998.
- [15] Li X., Cimini L., Effects of clipping and filtering on the performance of OFDM, Electron. Lett., vol. 2, n°5, pp.131-133, May 1998.



- [16] Muller S.H., Huber J.B, OFDM with reduced peak to average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences, *Elect. Lett.*, , vol. 33, n°5, pp. 368-369, Feb. 1997.
- [17] Baulm R., Fischer R., Huber J., Reducing the Peak-to-Average power Ratio of Multicarrier Modulation by Selecting Mapping, *Elect. Lett.*,, vol. 32, n°22, pp. 2056-2057, Oct. 1996.
- [18] J.A. Davis and J. Jedwab, "Peak-to-mean power control and error correction for OFDM transmission using Golay sequences and Reed-Muller codes" *Electron. Lett.*, Vol. 33, n°4, pp. 267-268, 1997.
- [19] Tellado J., Peak To Average Power Reduction for multicarrier modulation, PhD dissertation, Stanford University, Stanford, USA, 2000.
- [20] Jacques Palicot, Yves Louët "Power Ratio definitions and analysis in single carrier modulation", *EUSIPCO 05*, Antalya, Turkey, September 05.
- [21] Jacques Palicot, Yves Louët "Synthèse de la notion de facteur de crête et application aux modulations monoporteuses", *GRETSI 05*, Louvain la Neuve, Belgique, 6-8 Septembre 2005.
- [22] Steredenn Daumont, Basel Rihawi, Yves Louet "Root Raised Cosine filter influences on PAPR distribution of single carrier signals" *IEEE ISCCSP 08*, Malta, March 08
- [23] Rihawi B, Louët Y, Gaussian and Flat Rayleigh Fading Channel Influences on PAPR Distribution in MIMO-OFDM Systems, *European Wireless Conference*, Paris, France, April 2007
- [24] Yves Louët, Sajjad Hussain "Peak to Mean Power Ratio Statistical Analysis of continuous OFDM signals" *IEEE VTC 08*, Singapor, May 08
- [25] Yves Louët, Sajjad Hussain "Peak to Average Power Ratio Analysis of Multi-carrier and Multi-standard signals in software radio context" *IEEE ICTTA 08*, Damas, Syria, April 08
- [26] Sajjad Hussain, Jacques Palicot, Yves Louet, Sidkieta Zabre "Frequency Domain Interpretation of Power Ratio Metric for Cognitive Radio Systems", *IET Communications Journal*, vol.2, Issue 6, pp. 783-793, July 2008
- [27] Yves Louet and Jacques Palicot "A classification of methods for efficient power amplification of signals" *Annals of Telecommunications*, vol. 63, Issue 7-8, pp 351-368, July/August 2008
- [28] Y.Louët and A. Le Glaunec, " Peak-factor reduction in OFDM by Reed-Müller channel coding : a new soft decision decoding algorithm " *Proceedings of IEEE MELECON 2000*, Vol. 2, pp. 872-875, Cyprus, May 2000.
- [29] Y.Louët, A. Le Glaunec and P. Leray, " A soft decision decoding of product Reed-Muller and BCH codes for peak factor reduction and error correction in OFDM " *Proceedings of IEEE CSCC 2000*, Greece, July 2000.
- [30] S. Tertois, Y. Louët, G. Vaucher, A. Le Glaunec Réduction des effets des non-linéarités du signal OFDM à l'aide d'un réseau de neurones d'ordre supérieur, *Conférence internationale des Sciences Electroniques, Technologies de l'Information et Télécommunications 2003 (SETIT 2003)*, Tunis

- [31] Yves Louet, Desiré Guel, Jacques Palicot, Sidkiéta Zabré, Christian Lereau "Génération d'un signal additionnel et réduction de la dynamique d'un signal de modulation numérique" Brevet 0701174 (numéro d'enregistrement national)
- [32] Yves Louet, Sidkiéta Zabré, Jacques Palicot, Christian Lereau "Traitement d'un signal de communication avant amplification en modulation mutliporteuse" Brevet 0701922 (numéro d'enregistrement national)
- [33] Basel Rihawi and Yves Louet "PAPR Reduction Scheme with SOCP for MIMO-OFDM systems" International Journal of Communications, Network and System Sciences, vol.1, no 1, pp 29-35, Feb. 2008
- [34] Sidkiéta Zabré, Jacques Palicot, Yves Louët, Christian Lereau "SOCP approach for OFDM peak-to-average power ratio reduction in the signal adding context" , IEEE ISSPIT 06, Vancouver, Canada, August 06.
- [35] Irène Mahafeno, Yves Louët, Jean-François Hêlard " Peak-to-average power ratio reduction using second order cone programming based tone reservation for terrestrial digital video broadcasting systems", IET Communications Journal, vol. 3, Issue 7, pp. 1250-1261, July 2009 .
- [36] S. Ragusa, J. Palicot, Y. Louët and C. Lereau, Invertible Clipping for Increasing the Power Efficiency of OFDM Amplification, IEEE International Conference on Telecommunications, May 08-12, 2006, Madeira island, Portugal.
- [37] Desiré Guel, Jacques Palicot, Yves Louet, "Clipping HSC tenant compte des porteuses non utilisées" Brevet 0950895 (numéro d'enregistrement national)
- [38] Alexandre Skrzypczak, Yves Louët, Cédric Lehobey, Stéphane Molton and Olivier Rousset, Improving a DVB-H modulator performance bu using deep-clipping", soumise à la conférence ISWCS 09.
- [39] L.Alaus, J. Palicot, C. Roland, Y. Louët, D.Noguet "Promising technique of parametrisation for reconfigurable radio, the Common Operators Technique : fondamentals and examples", The Journal of Signal Processing Systems, publication en 2009.
- [40] Ali Al Ghouwayel, Yves Louët, Jacques Palicot "A reconfigurable Butterfly for the Fourier and Fermat transforms" , WSR 06, Karlsruhe, Germany, March 06.
- [41] Al Ghouwayel A, Louët Y, Palicot J, Complexity Evaluation of a Re-Configurable Butterfly with FPGA for Software Radio Systems, PIMRC 07, September 07, Athens, Greece
- [42] Ali Al Ghouwayel, Yves Louët, Jacques Palicot "A reconfigurable architecture for the FFT operator in a software radio context", ISCASS 06, Island of Kos, Greece, May 06
- [43] Ali Al Ghouwayel and Yves Louet "FPGA implementation of a re-configurable FFT for multi-standard systemes in software radio context", IEEE Trans. On Consumer Electronics Journal, vol. 55, n°2, pp. 950-958, May 2009.
- [44] Zabre S. Palicot J., Louët Y., Moy C., Lereau C., "Carrier per carrier analysis of SDR signals power ratio" SDR Forum Technical Conference, 13-17 Novembre 06, Orlando, USA.
- [45] Zabre S, Palicot J, Louët Y, Lereau C, Reduction of OFDM Peak to Mean Envelope Power Ratio using Ghost Carriers, The Third International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC 2007, Guadeloupe, March 07.

- [46] Guel D, Palicot J, Louët Y, Zabre S "Réduction du PAPR par Ajout de signal Artificiel hors bande dans un contexte de signaux mutliporteuses", Gretsï 2007, Troyes, France, Septembre 2007
- [47] Basel Rihawi, Yves Louët, Sidkiéta Zabré "PAPR Reduction scheme with SOCP for MIMO-OFDM", IEEE WICOM 07, Shanghai, China, September 07
- [48] Sufi Tabassum Gul, Ali Al Ghouwayel, Christophe Moy, Yves Louet "A novel design of reconfigurable Fourier Operator over C and GF(Ft) for future multi-standards SDR equipments", International Journal of Communication Networks and Distributed Systems, Inderscience, publication en 2009
- [49] Ali Al Ghouwayel, Yves Louët, Amor Nafkha, Jacques Palicot "On the FPGA Implementation of the Fourier Transform over Finite Fields GF(2m)" IEEE ISCIT07, Sydney, Australia, October 07
- [50] Yves Louet and Ali Al Ghouwayel "FPGA implementation of a reconfigurable FFT for software radio multistandard systems", IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas USA, Jan. 2009.
- [51] Basel Rihawi, Yves Louët "Peak to Average Power Ratio analysis in MIMO systems", ICCTA 06, Damas, Syria, May 06.
- [52] Rihawi B, Louët Y, Influence des canaux Gaussien et de Rayleigh sur la distribution du PAPR dans les systèmes MIMO-OFDM, Gretsï 2007, Troyes, France, Septembre 2007
- [53] Louët Y., Hussain S. "Tone Reservation's complexity reduction using fast calculation of maximal element", IEEE/ACM IWCMC 08, Crete, Greece, Aug. 08.
- [54] Louët Y, Hussain S, Peak to Average Power Ratio Reduction for Multi-band OFDM System using Tone Reservation, URSI General Assembly 08, Chicago USA, Aug 08
- [55] Guel D, Palicot J, Louët Y, A Geometric Method for PAPR Reduction in a Adding Signal in context for OFDM Signals, International Conference on Digital Signal Processing, DSP 2007, 1-5 July 2007, Cardiff, United Kingdom.
- [56] Yves Louet, Jacques Palicot, Sajjad Hussain "Power Amplification issues related to Dynamic Spectrum Access in the Cognitive Radio Systems", Cognitive Radio Systems ISBN 978-953-7619-25-1, In-Tech, 2009.
- [57] Irène Mahafeno, Yves Louët, Jean-François Hélaré "PAPR Reduction Method for OFDM Systems Using Dedicated Subcarriers : A Proposal for the Future DVB-T Standard", IEEE International Symposium on Broadband multimedia systems and broadcastings (BTS), Las Vegas, NV USA, April 2008.
- [58] Yves Louet, Irène Mahafeno, Jean François Hélaré "SOCP approach for PAPR reduction using Tone Reservation for the future DVB-T/H standards", 7th IEEE International Workshop on Multi Carrier and Solution (MC-SS), Herrsching, Germany, May 2009.
- [59] Irène Mahafeno, Jean-François Hélaré, Yves Louet "Procédé et dispositif de transmission d'un signal multiporteuse utilisant les mêmes porteuses pilotes pour réduire le rapport puissance crête à puissance moyenne" Brevet 0952964 (numéro d'enregistrement national)
- [60] Sajjad Hussain and Yves Louet "PAPR reduction of Software Radio signals using PRC method", IEEE Sarnoff Symposium, Princeton, NJ, Mar. 2009.

- 
- [61] Sajjad Hussain, Yves Louet, Jacques Palicot "PAPR variations on dynamic spectrum access in Cognitive Radio systems", Wireless Vitae Conference, Aalborg, Denmark, May 2009.
  - [62] Sajjad Hussain, Yves Louet, Jacques Palicot "Performance comparison of PRC based PAPR reductions schemes for WiLAN systems", European Wireless Conference , Aalborg, Denmark, May 2009.